

UNIVERSIDADE DE LISBOA



FACULDADE DE PSICOLOGIA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
FACULDADE DE MEDICINA  
FACULDADE DE LETRAS

# A MEMÓRIA COMO CONDIÇÃO PARA O SUCESSO DA COOPERAÇÃO

David Sousa

Dissertação orientada pelo Prof. Doutor Luís Correia e coorientada  
pelo Prof. Doutor Leonel Garcia-Marques

MESTRADO EM CIÊNCIA COGNITIVA

2017



*Aos meus pais,  
Fernando e Filomena  
e aos meus irmãos,  
Fernando e Sara*



## Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos o apoio incondicional, as conversas infinitas que a madrugada não espera e acima de tudo a inspiração de vida, amor e pensamento. Ao meus colegas, amigos e mais queridos pelo carinho e incentivo, e pelos dias e noites de filosofia, música e dança nos intervalos do trabalho, em especial à Ana, à Rita, ao Hugo, ao Paul, ao Marco, à Luana, à Franzi e à Cat com especial ternura. Aos meus orientadores Luís Correia e Gabriel Garcia-Marques pela disponibilidade, orientação, apoio e cooperação para a concretização desta tese. E agradeço a Deus, e ao forró, pela paz, tranquilidade e alegria que me foram essenciais.



Dissertação escrita segundo o antigo acordo ortográfico





### Resumo

Cooperar é um dilema que em várias circunstâncias implica um investimento num futuro incerto, que pode não ter retorno caso o parceiro ou os parceiros de interacção sejam oportunistas. Cooperar é o ideal para o grupo mas não cooperar compensa a curto-prazo. É a decisão racional, que maximiza o ganho pessoal em sacrifício do bem comum. Contudo, se essa estratégia for dominante pode dar-se a tragédia do bem comum. A verdade é que a cooperação observa-se a todos os níveis de organização biológica em coexistência com o egoísmo, possivelmente porque terá evoluído para prevenir a tragédia. E se for esse o caso, é possível que a cognição humana tenha evoluído ao serviço dos mecanismos que sustentam a cooperação para a sobrevivência, nomeadamente o mecanismo de reciprocidade, que ao nível cognitivo implica memória e linguagem para o controlo pessoal e social do oportunismo, e ao nível social e psicológico consiste num sistema complexo de normas morais, julgamento, sanções e emoções sociais para a regulação de comportamento. Neste trabalho apresenta-se um modelo multi-agente desenvolvido com o objectivo de avaliar a importância da memória e da linguagem para a construção de uma rede social de reciprocidade que permita sustentar a cooperação em condições adversas à sobrevivência, e executa-se uma série de experiências que demonstram que a cooperação resolve a tragédia do bem comum no tempo de vida dos agentes e que a cognição é necessária à cooperação. O tipo de modelo desenvolvido permitirá no futuro investigar a questão principal que motiva este estudo: Será que condições ecológicas adversas pressionam selectivamente a evolução da cognição, por meio da necessidade de cooperação para a sobrevivência?

**palavras-chave:** Memória; Cooperação; Sistemas de Multi-Agentes; Cognição funcional



**Abstract**

To cooperate is a dilemma that in many circumstances implies an investment in an uncertain future, which may have no return if the partner or interaction partners are free-riders. Cooperation is the best for the group but selfishness compensates in the short term. It is the rational decision, which maximizes the personal gain while sacrificing the common good. However, if this is the dominant strategy, it may result in the tragedy of the commons. The truth is, cooperation is observed at all levels of biological organization in coexistence with selfishness, possibly because it has evolved to prevent the tragedy. And if that is the case, it is possible that human cognition has evolved at the service of the mechanisms that underpin cooperation for survival, in particular the mechanism of reciprocity, which at the cognitive level implies memory and language for personal and social control of free-riders, and at the social and psychological level consists of a complex system of moral norms, judgment, sanctions and social emotions to regulate behavior. In this paper we present a multi-agent model developed with the aim of evaluating the importance of memory and language to construct a social network of reciprocity to support cooperation in adverse conditions for survival. A series of experiments was carried out demonstrating that cooperation solves the tragedy of the commons in the lifetime of the agents and that cognition is necessary for cooperation. The type of model developed will allow further investigation within the main research question of this study: Do adverse ecological conditions selectively pressure the evolution of cognition through the need of cooperation for survival?

**Keywords:** Memory; Cooperation; Multi-Agent Systems; Functional cognition



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Introdução ao tema e objectivos . . . . .	1
1.2	Cooperação e cognição: duas faces da evolução . . . . .	4
1.3	Altruísmo recíproco . . . . .	8
1.4	Desafios cognitivos e soluções . . . . .	11
1.5	Memória, cérebro, sociedade e linguagem . . . . .	13
1.6	Reciprocidade indirecta . . . . .	16
1.7	Objectivos . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Métodos</b>	<b>21</b>
2.1	O modelo . . . . .	21
2.2	Configuração das experiências . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Experiências</b>	<b>27</b>
3.1	E1: todos cooperam <i>vs</i> ninguém coopera . . . . .	27
3.2	E2: o problema da cooperação incondicional . . . . .	28
3.3	E3: reciprocidade directa . . . . .	30
3.4	E4: reciprocidade directa e indirecta . . . . .	32
3.5	E5: reciprocidade sem diferenças cognitivas . . . . .	33
3.6	E6: condições para o sucesso da cooperação . . . . .	36
3.7	E7: dimensão de grupo e memória . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Discussão geral</b>	<b>43</b>
4.1	Revisão crítica do modelo . . . . .	44
4.2	Relevância dos resultados . . . . .	45
4.3	Investigação futura . . . . .	51

<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>52</b>
----------	------------------	-----------

	<b>Referências</b>	<b>53</b>
--	--------------------	-----------

## Lista de Figuras

1	Implementação do modelo na plataforma Netlogo. . . . .	22
2	(E1) Estudo independente do número de sobreviventes das populações cooperativa e não cooperativa considerando as três velocidades de regeneração da natureza: baixa, média e alta. . . . .	28
3	(E2) Evolução temporal das populações cooperativa e não cooperativa em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores. . . . .	29
4	(E3) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos com memória e não cooperativos em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores. . . . .	31
5	(E3 - rede) Grafo exemplo da situação final da rede de reciprocidade directa na condição de pressão ecológica média. . . . .	31
6	(E4) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos com memória e linguagem e não cooperativos em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores. . . . .	34
7	(E4 - rede) Grafo exemplo da situação final da rede de reciprocidade directa e indirecta na condição de pressão ecológica média. . . . .	34
8	(E5) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos e não cooperativos com memória e linguagem, em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores. . . . .	35
9	(E6a) Sucesso da cooperação em função da complexidade cognitiva nas configurações iniciais definidas por $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$ e na condição de pressão ecológica média. . . . .	38
10	(E6b) Sucesso da cooperação em função da complexidade cognitiva nas configurações iniciais definidas por $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$ e na condição de pressão ecológica alta. . . . .	39
11	(E7) Dimensão de grupo em função da memória $M = 0, 10, 20, \dots, 90$ ao final das simulações e em todas as condições de pressão ecológica. . . . .	41

## Lista de Tabelas

1	Tabela de ganhos do jogador J1 numa interacção tipo DP entre os jogadores J1 e J2. . . . .	9
2	(E6a) Média $\pm$ desvio padrão do sucesso da cooperação em cada população nas configurações iniciais definidas por $C_{ini} = 10, 20, \dots 90$ e na condição de pressão ecológica média. . . . .	38
3	(E6b) Média $\pm$ desvio padrão do sucesso da cooperação em cada população nas configurações iniciais definidas por $C_{ini} = 10, 20, \dots 90$ e na condição de pressão ecológica alta. . . . .	39



## 1

# Introdução

«[...] we are led by the hope of receiving good in return to perform acts of sympathetic kindness to others; and sympathy is much strengthened by habit. In however complex a manner this feeling may have originated, as it is one of high importance to all those animals which aid and defend one another, it will have been increased through natural selection; for those communities, which included the greatest number of the most sympathetic members, would flourish best, and rear the greatest number of offspring.»

- Darwin C. in *The descent of man, and selection in relation to sex*, 2 (1871).

«[...] those animals which acquire habits of mutual aid are undoubtedly the fittest. They have more chances to survive, and they attain, in their respective classes, the highest development of intelligence and bodily organization. If the numberless facts which can be brought forward to support this view are taken into account, we may safely say that mutual aid is as much a law of animal life as mutual struggle, but that, as a factor of evolution, it most probably has a far greater importance, inasmuch as it favours the development of such habits and characters as insure the maintenance and further development of the species, together with the greatest amount of welfare and enjoyment of life for the individual, with the least waste of energy.»

- Kropotkin P. in *Mutual aid among animals. Nineteenth Century*, 28 (165) (1890).

## 1.1 Introdução ao tema e objectivos

Em linguagem comum cooperação é um comportamento de entreaajuda. Em biologia da evolução a cooperação consiste em acções ou características específicas da espécie que beneficiam outros indivíduos. A ênfase está no resultado do comportamento em termos adaptativos e não no comportamento em si. Se a cooperação beneficia todos os indivíduos envolvidos chama-se mutualismo. Se em vez disso a cooperação comporta um custo para o actor designa-se de altruísmo (Kappeler e Van Schaik, 2006).

Em dilemas sociais de cooperação existe um conflito entre os interesses individuais e colectivos. A cooperação é o ideal para a sobrevivência da população mas a curto-prazo o oportunismo compensa, por isso teoricamente o egoísmo é favorecido pela selecção natural (Nowak, 2006). Contudo, caso se generalize a toda a população conduz à “tragédia do bem comum” (TBC) (Hardin, 1968). Nessa situação há um esgotamento de recursos devido à maximização dos ganhos individuais em sacrifício do bem comum, que pode resultar na extinção da população (Rankin, Bargum, e Kokko, 2007). O facto é que a cooperação é abundante na natureza (Dugatkin, 1997), possivelmente como resposta adaptativa colectiva a condições adversas à sobrevivência. Isto é, a cooperação resolve a tragédia e terá evoluído para esse feito (Rankin et al., 2007).

As nossas sociedades são um bom exemplo de cooperação. A cooperação humana difere da das outras espécies em função de aspectos psicológicos, cognitivos e sociais. Os actos de dar, receber e retribuir permeiam todos os aspectos da vida humana e de muitas outras espécies, mas enquanto a maior parte da cooperação na natureza ocorre ao nível de relações diádicas, os humanos estão muito mais frequentemente envolvidos na cooperação ao nível de grupo (do que as outras espécies). Este tipo de organização consiste na combinação da especialização individual e da divisão do trabalho (Fehr e Fischbacher, 2003; Kappeler e Van Schaik, 2006). Quais são os mecanismos subjacentes à evolução e manutenção da cooperação e qual a sua importância para a evolução humana?

Modelos analíticos e simulações computacionais procuram responder a esta questão, tentando prever as condições necessárias à evolução e manutenção da cooperação, testá-las e prever a psicologia, a cognição e o tipo de organização e normas sociais produzidas ou seleccionadas em diferentes cenários evolucionários. Experiências de laboratório permitem impor estruturas de interacção social que invocam a psicologia, a cognição e a moral em jogo fora do laboratório, permitindo analisá-las (Rand e Nowak, 2013). Como veremos, vários autores concordam que a cognição, a psicologia e a organização social humana terão evoluído no sentido de facilitar a cooperação para a sobrevivência.

Limitações cognitivas condicionam o comportamento animal, nomeadamente o comportamento cooperativo. Podem supor-se por exemplo restrições ao nível das capacidades de fazer estimativas temporais, detecção e castigo do oportunismo, análise de reputação, desvalorização temporal, discriminação numérica, aprendizagem, coordenação, comunicação e memória. Em particular, o esquecimento, a eventual interferência de processos computacionalmente exigentes e limites de memória são

limitações à sua eficácia em manter a cooperação – todo um reportório que limita as possibilidades de comportamento cooperativo (Stevens e Hauser, 2004). Aqui foco-me na memória e linguagem devido à sua importância de base para a reciprocidade. No contexto do problema da cooperação e da sua evolução, como veremos, a memória foi investigada maioritariamente como registo pessoal dos comportamentos anteriores próprios e do último parceiro em interacções descritas pela teoria de jogos, caracterizando deste modo tipos de estratégias diferentes. Teoricamente, a linguagem como forma de comunicação de informação social permite adicionalmente um registo colaborativo de informação. Contudo, poucos estudos investigaram a selecção de parceiros de interacção social com base em listas privadas e públicas de informação social, que requerem memória e comunicação (e.g. Santos, Pacheco, e Lenaerts, 2006; Santos, Pacheco, e Skyrms, 2011; Anh, Moniz Pereira, e Santos, 2011; Mariano e Correia, 2014). Estes estudos demonstram que tal promove a cooperação mas nenhum deles investigou o problema que motiva este trabalho: a interacção com a pressão ecológica no sistema. Este é portanto um domínio sub-explorado. Por estes motivos, a importância da memória para o sucesso da cooperação merece uma atenção mais interdisciplinar. Aqui, estudo a memória como um registo pessoal e colaborativo (através da comunicação de informação social) de identidades e comportamentos.

A introdução deste trabalho aborda principalmente o mecanismo de reciprocidade, a sua importância para evolução e manutenção da cooperação, e os principais desafios à sua estabilidade. A memória e a capacidade de comunicação de informação social são respostas cognitivas importantes e a complexidade da vida social estará implicada na sua evolução. Que no caso da espécie humana, permite também a reciprocidade indirecta, à qual é intrínseca a necessidade de normas morais e um sistema complexo de emoções sociais para a regulação de comportamento.

Neste trabalho apresenta-se um modelo multi-agente desenvolvido com o objectivo de avaliar a importância da memória e da linguagem para a construção de uma rede social de reciprocidade, que permita sustentar a cooperação em condições diferentes de pressão ecológica. Se a cooperação resolve a TBC no tempo de vida dos agentes e a cognição é necessária à cooperação, então, condições ecológicas adversas devem pressionar selectivamente a evolução da cognição, por meio da necessidade de cooperação para a sobrevivência.

## 1.2 Cooperação e cognição: duas faces da evolução

Em teoria da evolução, os indivíduos que têm mais êxito na competição por recursos e parceiros sexuais usufruem de maior sucesso reprodutivo, passando cópias dos seus genes à geração seguinte. Nisto consiste a selecção natural, na luta pela vida e sobrevivência dos mais apto. A competição é, neste quadro, o motor da evolução. E contra ela é difícil explicar a evolução e manutenção da cooperação.

De facto, o altruísmo que implica um sacrifício em benefício de outro indivíduo, oferece possibilidades de oportunismo, o que pode tornar a cooperação improvável na natureza. Contudo, a cooperação observa-se a todos os níveis de organização biológica, desde as moléculas, organelos e células, até aos indivíduos e grupos da mesma espécie ou mesmo de espécies diferentes (Hammerstein, 2003). Com a preocupação de explicar a sua evolução e manutenção, desenvolveram-se duas teorias principais: a teoria do parentesco (Hamilton, 1964) e a teoria do altruísmo recíproco, ou reciprocidade (Trivers, 1971).

Na “Origem das espécies”, Darwin descreve as tendências cooperativas de insectos sociais, como as formigas, abelhas e vespas, e introduz pela primeira vez a evolução da cooperação em grupos de indivíduos que mantêm relações de parentesco. Hamilton (1964) formaliza a teoria: o custo  $C$  e o benefício  $B$ , associados a qualquer comportamento social, medem-se em termos da sobrevivência e replicação - transmissão dos próprios genes à geração seguinte. A predisposição para ajudar indivíduos aparentados promove a difusão dos “genes altruístas” porque os benefícios obtidos de actos altruístas também favorecem o actor na proporção definida pela proximidade genética  $r$  entre os indivíduos ( $Br > C$ ). Possibilitando assim a selecção do comportamento cooperativo, desde que ambos partilhem os genes altruístas por descendência de um ancestral comum.

A teoria de Hamilton revelou-se fundamental para a investigação da evolução da cooperação, nomeadamente em sociedades de insectos (Bourke, 1997) e de primatas (Chapais e Berman, 2004). Mas não explica a evolução e manutenção da cooperação entre organismos sem relações de parentesco, como os vários exemplos de simbioses inter-espécies. Segundo a teoria do altruísmo recíproco, a evolução da cooperação é promovida pela simples troca de actos altruístas, independentemente da proximidade genética. Isso é possível se o benefício da reciprocidade compensar o custo do altruísmo, se o tempo de vida for suficientemente longo e se os grupos forem estáveis e socialmente tolerantes (as relações de dominância são inexistentes ou não inibem o florescimento da reciprocidade) - estas condições maximizam o número de encontros e, em particular, que ocorrem entre os mesmos indivíduos (Trivers, 1971).

Antes de Trivers (1971) considerava-se que o comportamento altruísta era produto de capacidades cognitivas avançadas, e portanto exclusivo da espécie humana e de algumas espécies de mamíferos (e.g. Williams, 1966). Trivers, por outro lado, sugere que a importância do altruísmo recíproco exerce uma pressão selectiva para o desenvolvimento cognitivo necessário à estabilidade da cooperação. Em particular, sugere que o aumento da capacidade craniana do homínídeo durante o Pleistoceno deve-se a esse processo. Nesse período da história evolutiva da nossa espécie estariam reunidas as circunstâncias não só biológicas mas também sociais e culturais que permitiriam interacções frequentes e grupos estáveis e socialmente tolerantes: tempo de vida longo; taxa de dispersão baixa facilitada pela interdependência mútua, por exemplo na defesa contra predadores, e ajuda na caça e no combate; e hierarquias de dominância relaxadas à semelhança do que existe nos chimpanzés (Trivers, 1971). É nestas circunstâncias da história evolutiva humana que surgem as emoções sociais, como a gratidão, a simpatia, a culpa e o sentido de justiça. A estabilidade da cooperação humana depende delas e da instituição de sistemas de regulação do comportamento social, como as normas morais.

A variabilidade cultural humana assenta em dois aspectos fundamentais: a evolução cultural cumulativa e a criação de instituições sociais. Do mesmo modo que se pode falar de herança genética, pode-se falar de herança cultural na evolução humana. Artefactos e comportamentos fazem parte do reportório cultural mutável e transmissível próprio de cada geração. Em particular, os comportamentos são governados por normas e regras socialmente estabelecidas. E subjacente a estes aspectos está um conjunto de técnicas e motivações únicas da espécie para a cooperação. As capacidades e motivações sócio-cognitivas de base, como a colaboração, comunicação e aprendizagem social, terão sido seleccionadas no processo de construção de nichos culturais e co-evolução genética e cultural. Nestes termos, as actividades cooperativas são o berço da cultura humana, e ainda que o seu processo evolutivo seja largamente desconhecido, a investigação aponta para que a sua origem esteja na complexidade da vida social e no problema da procura de alimento (Tomasello, 2009).

Numa perspectiva ligeiramente diferente da visão de Trivers, que não é incompatível mas complementar, Tomasello (2009) considera que o mutualismo é o lugar de nascimento das tendências cooperativas humanas e dos processos culturais baseados em instituições sociais. As instituições sociais representam organizações cooperativas e acordos sobre formas de interacção e imposição de regras aos não cooperantes. O processo mais básico e fundamental à cooperação é a aprendizagem pela imitação, e a tendência para o fazer consiste simplesmente na necessidade de aprovação social

e identificação com o grupo. Para além disso, as pessoas envolvem-se activamente na transmissão de conhecimentos a outros membros do grupo, nomeadamente técnicas, regras e normas, e não exclusivamente a indivíduos aparentados. Por isso esta actividade é uma forma de altruísmo. Segundo Tomasello, o altruísmo é um sub-produto do mutualismo. O mutualismo caracteriza-se por actividades colaborativas em que os participantes têm um objectivo comum mas papéis distintos, têm consciência disso e reconhecem que o sucesso pessoal e colectivo depende da co-participação, que só é possível através da coordenação, comunicação, tolerância e confiança. Apesar de não ser claro como estes aspectos terão evoluído, o mutualismo, um espaço de actividades protegido do oportunismo, possibilita a selecção do altruísmo. Contudo, para o altruísmo se aventurar em espaços desprotegidos - e aqui encaixa-se a visão de Trivers - é necessária a selecção de mecanismos que assegurem a sua viabilidade para sustentar a cooperação, nomeadamente a reciprocidade, a reputação, o castigo e as normas sociais de cooperação (morais), que mais adiante iremos explorar em maior detalhe. Como foi referido antes, a espécie humana desenvolveu emoções adaptadas à presença de normas morais, que assim demonstram a sua importância crítica para a evolução da espécie. A culpa e a vergonha, por exemplo, são respostas auto-punitivas que demonstram o reconhecimento das normas e tornam improváveis transgressões futuras. Tendo uma base biológica, são um bom exemplo da co-evolução da biologia e cultura humanas (Tomasello, 2009).

Depois de Trivers, foram investigados vários exemplos de reciprocidade na natureza. Alguns dos mais relevantes são: assistência mútua no combate e na alimentação em grupos de golfinhos (Connor e Norris, 1982); inspecção de predadores por pequenos peixes (Milinski, 1987; Dugatkin, 1988; Milinski, 1993); alianças competitivas, trocas de serviços de limpeza e partilha de comida em primatas e outros mamíferos (Packer, 1977; Wilkinson, 1984, 1988; De Waal e Luttrell, 1988; Hauser, Chen, Chen, e Chuang, 2003; De Waal e Brosnan, 2006; Hart e Hart, 1992). Nestes exemplos, os autores sugerem a necessidade de existir algum mecanismo de reconhecimento individual, comunicação, e em certos casos, de alguma forma básica de reputação.

A partilha de alimento é uma forma de cooperação fundamental, bem documentada em primatas, e um aspecto central da organização social, em particular dos grupos humanos: o problema colectivo de exploração de recursos em certos nichos ecológicos, pelos desafios e riscos que implica (de aquisição e produção de alimento e exposição a potenciais predadores por exemplo), invoca a necessidade de cooperação com base na reciprocidade para o recrutamento de companheiros e aliados, assim como o estabelecimento de normas de partilha (Jaeggi e Gurven, 2013a). Entre muitos dos exemplos estudados de comunidades agropastoris e de caçadores-recolectores

estão os Hiwi, da Venezuela, e os Ache, do Paraguai, cujas tendências cooperativas para a aquisição de alimento e partilha subsequente podem explicar-se com base na reciprocidade, tal como previsto pela teoria (Hill, 2002; Gurven, 2004). Uma meta-análise filogenética recente (Jaeggi e Gurven, 2013b) demonstra que a reciprocidade explica a partilha de alimento em humanos e outros primatas, e enfatiza a necessidade de compreensão dos mecanismos subjacentes, que nos distinguem do resto do reino animal. Diferenças de necessidade de partilha devem reflectir-se em diferenças psicológicas entre espécies.

O sucesso reprodutivo é a chave da evolução. Se vários grupos da mesma espécie competem no mesmo nicho ecológico sobrevive o grupo com maior adaptatividade média, isto é, aquele que em média gera maior número de descendentes. O altruísmo promove a adaptatividade dos indivíduos-alvo com um custo para o próprio, e se o contributo total do altruísta para a adaptatividade do grupo for superior ao custo implicado, o altruísmo promove as possibilidades de sobrevivência do grupo em competição com outros grupos. A teoria do parentesco e a teoria da reciprocidade pretendem explicar a evolução e manutenção do comportamento altruísta, mas estas teorias, segundo Simon (1992), referem-se a casos especiais de pouca importância para as sociedades modernas - sociedades económicas. Simon (1990) apresenta um modelo alternativo aplicado à biologia e à economia: quer o altruísmo seja definido socialmente ou geneticamente, a capacidade dos indivíduos de aprendizagem ao nível sócio-económico pode causar uma selecção positiva do altruísmo. O modelo baseia-se em dois pressupostos: (i) os seres humanos têm predisposição para aceitar, aprender e adquirir crenças e comportamentos socialmente aceitáveis, e (ii) limites de conhecimento e poder de processamento de informação afectam a capacidade de avaliar e comparar consequências de determinada acção e possíveis acções alternativas. Ora, se pelo menos uma parte de determinada população é permeável à aprendizagem social como descrita, essa parte goza de uma vantagem adaptativa  $D$  associada a aquisição de técnicas, crenças e comportamentos que a sociedade em princípio “sabe que são benéficas” para o sucesso colectivo, caso contrário não seriam seleccionadas na evolução cultural. E se, em particular, essa sociedade incita os seus membros a comportamentos altruístas, então, tende a beneficiar mais do que uma sociedade que não o faça, contudo, com um custo para o altruísta. Esse custo pode ser interpretado como uma taxa da sociedade sobre o benefício  $D$  que providencia a cada um dos seus membros ao induzi-los a comportamentos que beneficiam toda a sociedade, de modo que a contribuição total da sociedade para a adaptatividade de cada um dos seus membros é  $D - C$ . E nesse caso, desde que  $D > C$ , o altruísmo e a predisposição ou capacidade de aprendizagem social como descrita têm vantagens

selectivas. É relevante perguntar porque é que não se há-de evitar comportamentos altruístas já que estes são taxados. Tal acontece porque devido a (ii) é difícil discriminar entre instruções sociais que reduzam ou aumentem a adaptatividade. Dificuldade que é reforçada pela tendência para a conformidade com as normas sociais. Nestes termos, o altruísmo surge novamente como um sub-produto, mas desta vez, da predisposição para a aprendizagem social de certos comportamentos que apesar de implicarem um sacrifício pessoal beneficiam o colectivo, mas que em último caso são compensados pela “aprendizagem social total”. A eventual emergência de sanções sociais a desvios ao comportamento normal promove também o altruísmo e a predisposição ou capacidade de aprendizagem social. O altruísmo pode consistir também em normas que incitem a instrução de outros sobre o comportamento social apropriado, nomeadamente o próprio altruísmo, detecção de oportunistas e castigo de comportamentos inapropriados (Simon, 1990, 1992, 1993; Knudsen, 2003). Neste sentido, a teoria de Simon da selecção do altruísmo não é incompatível com os mecanismos de reciprocidade que visitaremos adiante em maior detalhe, apenas reformula a ordem evolutiva.

Em suma, qualquer que seja a ordem evolutiva, a reciprocidade é pelo menos um mecanismo que sustenta a cooperação e o seu estudo merece uma atenção interdisciplinar, que se prende com a compreensão dos mecanismos psicológicos, cognitivos e sociais fundamentais ao serviço dessa estratégia de sobrevivência e vivência colectiva. Veremos que a memória está ao serviço do reconhecimento individual e da linguagem para a troca de informação social, tendo uma importância inquestionável para a estabilidade da reciprocidade e o sucesso da cooperação.

### 1.3 Altruísmo recíproco

O altruísmo recíproco consiste na troca de actos altruístas entre dois indivíduos de modo que ambos beneficiem numa série de interacções simétricas ( $B > C$ ) (Trivers, 1971). A estrutura deste tipo de interacção é idêntica à do dilema do prisioneiro (DP): se os dois cooperam, ganham  $B - C$  que é melhor do que os dois não cooperarem, situação em que não ganham nada. Se apenas um deles não cooperar ganha  $B$  sem qualquer custo, que é o maior ganho possível, enquanto que o outro é explorado tendo um custo  $C$  sem qualquer benefício (Tabela 1). Numa interacção única deste tipo, não cooperar é a escolha que maximiza o ganho, contudo, a selecção natural pode desfavorecer essa escolha se a longo-prazo tiver efeitos adversos para a sobrevivência. Pode acontecer por exemplo que o altruísta deixe de o ser uma vez que



esse comportamento implica um custo perdido. Deste modo, a selecção do comportamento cooperativo na evolução das espécies implica por um lado que o esforço altruísta seja correspondido, e por outro, algum mecanismo de detecção do oportunismo. Para isto, as circunstâncias biológicas devem maximizar o número possível de actos altruístas, maximizar a repetição de actos altruístas entre os mesmos indivíduos (pelo menos durante parte da vida) e permitir interacções simétricas entre os mesmos indivíduos, isto é, que envolvem custos e benefícios idênticos (Trivers, 1971).

J1 \ J2	Cooperar	Não cooperar
Cooperar	$B - C$	$-C$
Não cooperar	$B$	0

Tabela 1: Tabela de ganhos do jogador J1 numa interacção tipo DP entre os jogadores J1 e J2.

Numa população em que as interacções são do tipo do DP e aleatórias, a escolha “egoísta” é uma estratégia evolucionariamente estável (EEE) (Axelrod e Hamilton, 1981), isto é, se a grande maioria da população a adoptar nenhuma estratégia mutante pode substituí-la. Contudo não é a única. Num torneio computacional do DP iterado e simultâneo (as decisões dos jogadores são tomadas em simultâneo), Axelrod e Hamilton (1981) demonstram que se a probabilidade de reencontro  $w$  entre os mesmos indivíduos é suficientemente grande e  $Bw > C$ , a estratégia Tit-For-Tat (TFT), que consiste em responder “na mesma moeda”, não só é robusta como também é uma EEE. Esta consiste em cooperar na primeira interacção e imitar a jogada anterior do parceiro em todas as interacções seguintes entre os dois.

O torneio computacional consiste no seguinte: várias estratégias definidas por regras diferentes de tomada de decisão no DP são testadas. Cada uma joga o DP, por exemplo 200 vezes com cada uma das outras a cada ronda, e, consoante o sucesso nessa ronda, é excluída da população ou replicada e submetida para a ronda seguinte num número proporcional ao seu sucesso. O processo é repetido até sobreviver apenas a estratégia mais bem sucedida.

A robustez da TFT, isto é, a capacidade de competir com outras estratégias mais ou menos sofisticadas e sobreviver num meio diverso, deve-se à “simpatia” do acto cooperativo inicial, à capacidade de retaliação através da não cooperação, caso o parceiro não coopere, e à capacidade de “perdoar”, voltando a cooperar caso o parceiro também volte a cooperar. A viabilidade inicial da TFT depende de circunstâncias biológicas e sociais, como a proximidade genética e/ou proximidade

espacial de indivíduos tendencialmente altruístas. Segundo Axelrod e Hamilton (1981) o comportamento dos indivíduos em interacções do tipo do DP é tanto mais complexo e rico quando maior a complexidade cognitiva dos agentes envolvidos. Nas condições formalizadas - sugerem - a cooperação pode evoluir com base na reciprocidade.

Errar é natural. Nas interacções sociais, identidades, intenções e comportamentos podem ser mal interpretados, não reconhecidos ou até mesmo esquecidos. Comportamentos por engano são biologicamente plausíveis. No jogo iterado do DP entre dois indivíduos que usam a TFT, basta que um deles se engane para ficarem permanentemente dessincronizados e sem capacidade de reestabelecer uma relação benéfica de reciprocidade. Numa análise matemática detalhada, Nowak (1990) considera esta possibilidade através da introdução de erros e demonstra a importância do perdão ocasional para restabelecer a cooperação, relaxando o pressuposto rígido de imitação estrita que define a TFT. Uma estratégia como esta, que consiste na TFT mas com uma certa probabilidade de cooperar após um acto não cooperativo do parceiro, designa-se de TFT generosa (TFTg). Simulações computacionais semelhantes às de Axelrod e Hamilton (1981) mostram que numa população de agentes que usam a TFT original, mas com uma certa probabilidade de engano, a TFTg, pela sua capacidade de corrigir erros é mais robusta do que a TFT original (Nowak e Sigmund, 1992). A selecção natural pode promover o perdão porque errar é natural.

Estas estratégias baseiam-se na memória da jogada anterior do parceiro, isto é, 1 bit de memória. Se, em vez disso os agentes têm a capacidade de memorizar a jogada de ambos na ronda anterior, isto é, 2 bits de memória, então, em simulações deste tipo, uma estratégia mais robusta é a *Win-Stay Lose-shift* ou Pavlov, que consiste em repetir a decisão da ronda anterior caso essa tenha compensado (quando ambos cooperam ou o parceiro coopera e o próprio não), ou caso contrário tomar a decisão alternativa (Nowak e Sigmund, 1993). A robustez superior desta estratégia deve-se à sua capacidade de se proteger do oportunismo, corrigir erros e explorar altruístas. Contudo limita-se aos jogos simultâneos. Se os jogadores alternarem nos papéis de doador e recipiente, o que parece imitar melhor o mundo real, a robustez da TFTg é superior (Nowak e Sigmund, 1994). De facto, os seres humanos tendem a jogar Pavlov e TFTg, sendo o sucesso da última superior no jogo alternado e inferior no jogo simultâneo (Wedekind e Milinski, 1996).

A teoria da reciprocidade, pela sua formulação em teoria de jogos, tornou-se uma componente teórica muito importante para o estudo e compreensão do comportamento social e da sua evolução. O contributo mais importante é sem dúvida

a demonstração de que a evolução da cooperação e a sua manutenção requerem (i) que as interacções sejam frequentes e continuadas, (ii) que o benefício da reciprocidade compense o custo do altruísmo (iii) e alguma capacidade de reconhecer outros indivíduos, detectar o oportunismo e agir de acordo. É pertinente perguntar: com que crenças e expectativas é que os indivíduos participam neste tipo de interacções? E como é que aspectos computacionais como a memória estão implicados? A importância da teoria da reciprocidade prende-se também com a sua influência na mudança de paradigma da revolução cognitiva (Taylor e McGuire, 1988).

## 1.4 Desafios cognitivos e soluções

O altruísmo implica um investimento num futuro incerto. Considerando as condições necessárias à estabilidade da reciprocidade são vários os desafios cognitivos que estas implicam. Possíveis atrasos temporais e desvalorização temporal dos benefícios a longo-prazo são exemplos disso. A desvalorização temporal refere-se a potenciais benefícios futuros que perdem valor subjectivo com o passar do tempo resultando numa preferência por recompensas imediatas mesmo que em alguns casos sejam menores. Tal acontece porque o futuro é incerto (Stevens e Hauser, 2004).

Os animais podem usar estratégias que se traduzam em benefícios imediatos, como o mutualismo, pela qual, por definição, o egoísmo não compensa relativamente ao altruísmo, não havendo por isso tentações oportunistas, como são alguns casos de simbioses de limpeza. O mutualismo contorna a necessidade de soluções cognitivas para o problema da desvalorização temporal porque tal não acontece. Os benefícios são imediatos ou quase imediatos. Em geral esta estratégia não implica os mesmos requisitos cognitivos que implica a cooperação baseada no parentesco: reconhecimento de parentes através de pistas contextuais ou por exemplo odores e vocalizações. E no caso do altruísmo recíproco: aprendizagem das consequências benéficas da cooperação a longo-prazo através da memorização de eventos passados e reconhecimento dos indivíduos envolvidos em interacções relevantes, como é exemplificado pela partilha de alimento (Stevens e Hauser, 2004; Stevens e Gilby, 2004; Stevens, Cushman, e Hauser, 2005). Entre chimpanzés, por exemplo, pode haver um atraso significativo em interacções diádicas. A memória de um favor recebido e o reconhecimento do indivíduo altruísta induzem uma atitude positiva para com esse indivíduo (De Waal e Brosnan, 2006), um mecanismo psicológico descrito por Trivers (1971) como gratidão.

A memória não está isenta de limitações. O esquecimento, a interferência e a ca-

pacidade de processamento e armazenamento de informação restringem a frequência e continuidade da reciprocidade. Tarefas simultâneas e computacionalmente exigentes podem interferir na memória. Milinski e Wedekind (1998) testaram em humanos como é que interferências na capacidade da memória de trabalho afectam a cooperação numa série de jogos do DP alternando-os ou não com um jogo de memória e verificaram que a interferência na capacidade influencia o tipo de estratégia empregue. Enquanto os jogadores na condição de memória limitada (pela interferência do jogo de memória entre jogos do DP) tiveram tendência a usar a TFTg, os outros tiveram tendência a usar as estratégias computacionalmente mais exigentes do tipo Pavlov (recorde-se que decidir em função de eventuais recompensas anteriores requer a memorização do comportamento próprio e do parceiro). Estes resultados sugerem que interferências na capacidade da memória afectam o pensamento estratégico e portanto condicionam o comportamento social. Mesmo que a reciprocidade não seja perturbada por interferências, a memória é limitada. Qualquer potencial parceiro adicional aumenta as exigências computacionais de manter um registo de obrigações recíprocas com múltiplos parceiros (Stevens e Hauser, 2004).

Alternativamente, a estabilidade da cooperação pode depender de mecanismos como a filopatria e a territorialidade, que minimizam a necessidade de memória, e na ausência de um mecanismo de reconhecimento poderá depender por exemplo do contacto permanente característico de algumas associações mutualistas inter-espécies. Exemplos clássicos são o líquen, as associações entre árvores e os seus fungos micorrízicos, e as colónias de microorganismos residentes em organismos maiores. É possível contudo que caso se quebre o contacto entre os organismos envolvidos na relação simbiótica estes sejam alvos de parasitismo (Axelrod e Hamilton, 1981).

A simples possibilidade dos organismos se movimentarem representa um desafio à estabilidade da reciprocidade. Num modelo matemático detalhado, Enquist e Leimar (1993) demonstram que a mobilidade de organismos em interações tipo DP afecta negativamente a evolução da cooperação: um oportunista eficiente pode mover-se rapidamente numa população cooperativa à procura de vítimas. As propriedades do contexto social, como a dimensão e a densidade da população afectam a eficiência dessa procura e consequentemente a evolução da cooperação. Numa população cooperativa grande e densa é mais fácil encontrar vítimas, por isso o oportunismo compensa e inviabiliza a cooperação. Adaptações comportamentais de controlo social, como a troca de informação social (identificação social dos indivíduos oportunistas) permitem contra-atacar os efeitos da mobilidade e favorecer a cooperação. Enquist e Leimar demonstram que assim é possível estabilizar a cooperação, mesmo em populações muito densas. Os autores sugerem que a linguagem humana

serve esse propósito e notam que estratégias cooperativas condicionais como esta só podem evoluir em coexistência com oportunismo “à altura”, caso contrário não têm qualquer vantagem adaptativa e portanto possibilidades de selecção natural.

A importância da memória para a estabilidade da reciprocidade prende-se com a necessidade do controlo pessoal e social do oportunismo e a capitalização do esforço altruísta através do reconhecimento individual e comunicação entre agentes. De seguida pretende-se explicar de que modo é que a complexidade da vida social poderá estar implicada na evolução cognitiva humana.

## 1.5 Memória, cérebro, sociedade e linguagem

O reconhecimento de faces, vocalizações e gestos - de que são capazes várias espécies primatas para o conhecimento da hierarquia no grupo, das relações de parentesco e percepção de comportamentos – são ferramentas necessárias às interações e tácticas sociais de competição e cooperação que caracterizam a complexidade da vida em grupo. São disso exemplo, ameaças defensivas, formação de alianças na competição, entreaajuda na exploração de recursos ou na defesa contra predadores, reconciliação após disputas, partilha de comida, troca de serviços de limpeza, etc. Estas são entre outras, situações que caracterizam a complexidade da vida social dos animais, que depende não apenas de circunstâncias ecológicas mas também dos aspectos cognitivos subjacentes à adaptatividade individual e colectiva ao meio (Byrne e Bates, 2010). A dimensão de alguns grupos de animais, nomeadamente, é função do volume neocortical relativo da espécie - convencionalmente associado ao poder de processamento de informação no cérebro. Comparando por exemplo entre várias espécies de primatas não-humanos e também algumas espécies de mamíferos, carnívoros e insectívoros, quanto maior o volume neocortical relativo, maior a dimensão média do grupo (Dunbar, 1992, 1998). Jolly (1966) e Humphrey (1976) defendem que a cognição dos primatas evoluiu como resposta adaptativa a uma vida social complexa, e nesse caso, a inteligência não social ou técnica e inventiva dos primatas pode ser vista como um sub-produto da evolução da inteligência social, que segundo a hipótese do cérebro social resulta do efeito selectivo do volume neocortical (Dunbar, 1998).

Dunbar (1992) sugere que o número de neurónios neocorticais limita a capacidade de um organismo de processar informação, nomeadamente informação social como o número de relações que consegue monitorizar simultaneamente. Quando um grupo excede esse limite torna-se instável e começa a desfragmentar-se, o que impõe

um limite à dimensão do grupo. Se existe uma correlação entre o volume neocortical e a capacidade de registar informação social como a identidade dos indivíduos, histórico de interacções pessoais e entre terceiros, e padrões de comportamento, então, uma vida social dinâmica e desafiante poderá exercer uma pressão selectiva para o aumento do volume neocortical e a consequente promoção da eficiência da memória (Byrne, 1996). De facto, a complexidade social não é apenas determinada pelo número de indivíduos na sociedade mas também pela natureza das relações que se estabelecem entre eles. Para além de que se o número de indivíduos num grupo aumenta, também aumenta o número de possibilidades estratégicas em interacções e relações poliádicas (Whiten e Byrne, 1997; Barton e Dunbar, 1997; Dunbar, 1998) de modo que uma “boa” memória é necessária.

Uma “boa” sociedade também é necessária. Diversos factores ecológicos condicionam a dimensão e a organização dos grupos de animais. O risco de predação inerente à exposição que resulta de hábitos de exploração de recursos é um factor de pressão externa, e quanto maior o grupo, maior a capacidade de proteger os seus membros. Mas ainda que isso seja uma vantagem para cada indivíduo, viver em sociedade também implica os custos inerentes à competição por recursos (espaço físico, comida e parceiros sexuais). A constituição das hierarquias de dominância e os seus efeitos demonstram como os animais coordenam os seus comportamentos de formas que nem sempre são ideais para cada indivíduo. Isto é, há factores de pressão externa e interna próprios da estabilidade da sociedade. A minimização do risco de ser vítima de um predador (pela proximidade aos restantes membros do grupo) compensa as tensões devidas às exigências da hierarquia e de comportamentos oportunistas. Caso contrário estas provocariam a desfragmentação da sociedade, que em suma resulta do compromisso dos objectivos individuais a curto-prazo - através do qual aumentam as possibilidades individuais de sobrevivência (Dunbar, 1988b, 1988a). Segundo Dunbar, tal compromisso só é possível através de algum mecanismo de coesão social específico da espécie, como a troca de serviços de limpeza, que induz a confiança mútua e permite a formação de alianças. Uma correlação positiva entre a dimensão de grupo de várias espécies de animais, como os primatas, os cavalos e os morcegos, e o tempo dedicado a esta actividade apoia esta hipótese (Dunbar, 1991). Em particular, os primatas dedicam 20% do tempo de vigília a essa actividade, a que corresponde uma dimensão de grupo de cerca de 80 indivíduos (Dunbar, 1993).

Da relação obtida entre o volume neocortical relativo dos primatas não-humanos e a dimensão média dos grupos, Dunbar (1993) prevê que ao volume neocortical relativo da espécie humana deve corresponder uma dimensão média de grupo de 150 indivíduos. Considerando que o volume do cérebro humano não se alterou

nos últimos 250 000 anos, e que a evolução cultural humana teve um ritmo mais acelerado do que a evolução anatómica nos últimos milénios, Dunbar argumenta que ao volume cerebral actual deve corresponder um modo de vida semelhante ao das sociedades humanas do Pleistoceno tardio, típico das sociedades de caçadores-recolectores. Na sua investigação verifica que a dimensão média de uma sociedade deste tipo é de facto de cerca de 150 indivíduos, como previsto, e conclui que este deve ser o maior número possível de indivíduos num grupo humano em que todos mantêm relações pessoais com todos - o mesmo motivo que deve condicionar a dimensão dos grupos de primatas - por isso considera que esta é a dimensão natural dos grupos humanos. Dunbar observa ainda que agrupamentos desta dimensão são muito frequentes na organização de grandes sociedades humanas, muito dependentes do estabelecimento de hierarquias. Numa sociedade de agrupamentos, as relações que não são do conhecimento pessoal dos indivíduos são orientadas por tipos de comportamentos dirigidos a tipos de grupos (Dunbar, 1993).

Se à semelhança dos primatas não-humanos a coesão de grupos humanos naturais dependesse da troca de serviços de limpeza, o tempo de dedicação necessário a essa actividade seria de cerca de 42% do tempo de vigília, mais do dobro que os primatas não-humanos dedicam à socialização, o que seria catastrófico dadas as restantes necessidades básicas de sobrevivência e as suas exigências de consumo de tempo. Em algum ponto da história evolutiva, os hominídeos terão começado a desenvolver algum mecanismo de coesão social que permitiria ultrapassar o limite associado aos grupos de primatas não-humanos usando de forma mais eficiente o tempo dedicado à socialização sem negligenciar a dedicação necessária à exploração de recursos para a sobrevivência. A linguagem, por permitir um maior número de indivíduos envolvidos nas interacções sociais e “libertar as mãos” para outras tarefas simultâneas parece servir essa função. De facto, os seres humanos em conversa dedicam a mesma quantidade de tempo que os primatas não-humanos à socialização (Dunbar, 1993).

A linguagem serve à troca de informação, principalmente sobre o estado da rede social: Dunbar, Marriott, e Duncan (1997) mostram que as conversas entre as pessoas são dominadas por assuntos sociais, como relações e oportunidades sociais próprias e dos outros. Além disso a linguagem permite receber e transmitir informação social para além daquela que cada indivíduo pode obter em primeira mão e gerir dessa forma a reputação própria e influenciar a dos outros. Possibilidades que ultrapassam as limitações dos primatas. Como a coesão dos grupos sociais se baseia em relações de confiança, o problema do oportunismo é central às sociedades humanas. Como tal, a identificação social dos oportunistas é uma componente

importante da troca de informação social e portanto uma função importante da linguagem (Enquist e Leimar, 1993; Dunbar, 2004). Por estes motivos, porque a linguagem permite acordos sobre as normas de comportamento e sanções, e por motivos logísticos, a linguagem é fundamental à coordenação da actividade de vários agentes para o sucesso da cooperação (Smith, 2010).

A complexidade da vida social consiste na coexistência conflituosa da competição e da cooperação para a sobrevivência. A cognição humana terá evoluído para responder a essa complexidade no sentido de detectar oportunidades competitivas e cooperativas favoráveis à sobrevivência. Em particular, a cooperação entre indivíduos não aparentados e até mesmo desconhecidos é possível porque como vimos a espécie humana desenvolveu mecanismos específicos de minimização das tendências oportunistas e maximização do retorno altruísta, nomeadamente a gestão da reputação em função da moral estabelecida. De seguida explora-se mais detalhadamente esta questão.

## 1.6 Reciprocidade indirecta

A cooperação humana consiste numa combinação de reciprocidade directa (eu ajudo-te e tu ajudas-me) (Trivers, 1971) e indirecta (eu ajudo-te e alguém me ajuda depois) (Alexander, 1987). As pessoas cooperam para manter uma boa reputação. Do ponto de vista evolutivo é essa a função do comportamento moral porque uma boa reputação aumenta a probabilidade de ser compensado no futuro (Alexander, 1987; Nowak e Sigmund, 2005; Sperber e Baumard, 2012; Wu, Balliet, e Van Lange, 2016). De acordo com isto foram investigados alguns exemplos de reciprocidade indirecta em comunidades agropastoris e de caçadores-recolectores, nomeadamente os Quechua do Peru (Lyle e Smith, 2014) e os Ache do Paraguai (Gurven, Allen-Arave, Hill, e Hurtado, 2000): actos cooperativos como o auxílio na produção de alimento e a sua partilha reflectem-se numa reputação positiva para a generosidade e consequentemente em maior apoio social em circunstâncias em que por exemplo, por algum motivo, a produção desse indivíduo diminui ou esse indivíduo fica doente ou sofre algum acidente que o impede temporariamente de adquirir ou produzir alimento - resumindo - em condições adversas à sobrevivência.

Em modelos teóricos da evolução da reciprocidade indirecta os agentes jogam o DP iterado alternado mas nunca com o mesmo parceiro mais do que uma vez. Um agente pode adoptar uma de três estratégias: não cooperação, cooperação incondicional ou cooperação condicional baseada nalguma regra de avaliação do compor-



tamento passado do parceiro. Num modelo muito simples de reputação binária a cooperação condicional baseia-se no comportamento do parceiro na ronda anterior: se foi cooperativo a reputação é boa e portanto cooperar, caso contrário não cooperar. E caso o comportamento passado do parceiro seja conhecido com probabilidade  $q$ , então na dúvida cooperar. Segundo esta lógica um agente que recuse ajudar um agente “mau” torna-se também ele “mau” reduzindo as possibilidades próprias de benefícios futuros. A isto se chama “castigo altruísta”, que apesar do custo implicado pode promover a cooperação desde que  $Bq > C$  (Nowak e Sigmund, 1998; Leimar e Hammerstein, 2001; Panchanathan e Boyd, 2003). O que é plausível, considerando que o castigo altruísta pode de facto promover a cooperação em dilemas sociais humanos (Fehr e Gächter, 2002; Fehr e Fischbacher, 2003). É legítimo perguntar se é justo perder a reputação ao recusar ajudar um agente “mau”. Pode considerar-se que esse comportamento é justificado, que a reputação se mantém e o castigador não tem nada a perder. Nesse caso a cooperação condicional baseia-se numa regra de avaliação de segunda ordem: que implica o conhecimento do comportamento do parceiro do parceiro duas rondas antes, de modo que tanto a acção como a intenção do parceiro na ronda anterior são tomadas em conta. Esta estratégia é uma EEE (Sugden, 1986; Panchanathan e Boyd, 2003). Note-se que para isto é necessário o consenso entre todos os membros da população sobre a reputação de cada indivíduo, o que só é possível através da difusão de informação social. A comunicação permite-o e é necessária porque nem toda a população tem acesso a informação em primeira mão, contudo note-se, também permite a manipulação de informação e a difusão de rumores sem fundamento. Essas possibilidades e eventuais erros de percepção podem dificultar o sucesso da cooperação. Por estes motivos torna-se importante investigar a co-evolução da linguagem humana e da cooperação baseada na reciprocidade indirecta (Nowak e Sigmund, 2005).

Jogos de reciprocidade indirecta entre humanos demonstram que a reputação influencia a decisão de cooperar (Wedekind e Milinski, 2000). Em particular, quando o histórico do comportamento passado de cada jogador é tornado público, a cooperação é mais frequente do que no caso em que os jogadores sabem que essa informação não é apresentada aos parceiros de interacção (Seinen e Schram, 2006). Para além disso, e como previsto pela teoria, informação complementar de segunda ordem aumenta a cooperação porque oferece a oportunidade de justificar o comportamento anterior do parceiro (Bolton, Katok, e Ockenfels, 2005). As pessoas são mais generosas para quem demonstrou maior generosidade no passado mas na ausência de informação explícita não deixam de o ser.

A interacção entre dilemas sociais é outro aspecto interessante a considerar por-

que frequentemente os indivíduos participam em múltiplos dilemas em simultâneo (Rand e Nowak, 2013). Em geral as pessoas cooperam mais do que a teoria de jogos prevê, contudo, no jogo do bem comum (JBC) observa-se que a cooperação é heterogénea e diminui com o passar do tempo acabando por não ser produzido qualquer benefício colectivo (Fehr e Fischbacher, 2003). Situação equivalente à TBC. Todos os indivíduos iniciam o jogo com a mesma quantia e a cada ronda podem investir no bem comum, que é multiplicado por um número  $k$  inferior ao número total de jogadores  $n$  ( $1 < k < n$ ) e redistribuído por todos. Se todos cooperarem todos saem a ganhar, mas a tendência para o oportunismo que compensa a curto-prazo leva a que o egoísmo se generalize e não compense a longo-prazo. A tragédia resolve-se possibilitando aos jogadores castigar (castigo altruísta) os jogadores oportunistas ao final de cada turno do JBC (Fehr e Gächter, 2002) ou alternando os turnos do JBC com turnos de reciprocidade indirecta (Milinski, Semmann, e Krambeck, 2002). No primeiro caso porque as contribuições aumentam para evitar o castigo e no segundo caso para manter uma reputação favorável: se nas rondas de reciprocidade indirecta os jogadores são informados do comportamento do parceiro na ronda anterior do jogo do bem comum, tendem a ser mais generosos para aqueles que contribuíram mais. Por outro lado, a motivação para contribuir para o bem comum é influenciada pela expectativa de recompensa no turno seguinte do jogo da reciprocidade indirecta. Deste modo é possível manter a cooperação e produzir o benefício colectivo.

A reciprocidade indirecta é possível através da gestão da reputação, do julgamento moral, e do castigo altruísta. E devido às exigências cognitivas subjacentes (armazenamento, transferência de informação e pensamento estratégico) poderá também estar implicada na evolução da cognição humana para a cooperação (Nowak e Sigmund, 2005; Trivers, 2006). Em algum momento da história evolutiva humana a reciprocidade indirecta terá trazido vantagens adaptativas relativamente à reciprocidade directa, menos exigente do ponto de vista cognitivo.

## 1.7 Objectivos

Até agora contemplámos a importância de modelos analíticos e computacionais para a investigação das condições que permitem a evolução da cooperação e da cognição subjacente, assim como alguns exemplos experimentais que apoiam os resultados teóricos. O objectivo deste trabalho prende-se com a integração da componente ecológica nesta linha de investigação, especificamente: avaliar a importância da memória e da linguagem para a construção de uma rede social de reciprocidade que

permita sustentar a cooperação em condições diferentes de pressão ecológica. A perspectiva funcional sobre a cognição, tentando explicar a natureza dos processos cognitivos a partir dos problemas que resolvem ou dos objectivos que permitem alcançar (James, 1890; Fiske, 1992) enquadra-se perfeitamente no modelo que iremos apresentar.

SMA permitem integrar aspectos psicológicos, cognitivos, sociais e ecológicos através da modelação do meio, dos objectos no meio, dos agentes, do comportamento dos agentes e das interacções entre eles e os objectos – uma abordagem de baixo para cima (do inglês *bottom-up*), que resulta na emergência de fenómenos observáveis ao nível do sistema e que só têm justificação ao nível da actividade local dos agentes e da sua arquitectura (Bousquet e Le Page, 2004). Um estudo recente baseado em SMA investigou a importância da cooperação baseada na memória para a sobrevivência em diferentes condições de pressão ecológica. Resumindo, Zibetti, Carrignon, e Bredeche (2016) utilizam a plataforma Netlogo (Wilensky, 1999) de modelação de sistemas multi-agente para criar um mundo virtual onde existem árvores que são a fonte de energia dos agentes. A pressão ecológica é modelada pela densidade de obstáculos e pela taxa de regeneração das árvores. Os agentes procuram árvores e perdem energia em deslocamento. Se encontram uma árvore colhem um fruto e recuperam a energia, mas se perdem toda a energia antes de encontrar uma árvore morrem. Os agentes podem interagir de modo a partilhar energia. Os agentes cooperativos respondem positivamente a pedidos de energia, o que implica a transferência de uma parte da sua energia, e os agentes não cooperativos respondem negativamente. Contudo, caso receba três respostas negativas consecutivas, um agente cooperativo passa a usar a estratégia TFT, sem discriminação dos agentes que fazem os pedidos seguintes, mas imitando somente a última resposta a um pedido efectuado. Caso receba mais três respostas negativas torna-se não cooperativo. Simetricamente, um agente não cooperativo pode tornar-se um *tit-for-tater* temporário e posteriormente cooperativo. Deste modo, a memória (de 3 bits) assume um papel fundamental para a mudança de estratégia através de uma generalização sobre o comportamento da população com base nas interacções mais recentes. O resultado principal é que a estratégia cooperativa oferece mais possibilidades de sobrevivência do que a estratégia não cooperativa.

O modelo que se apresenta inspira-se no modelo anterior. Antes de descrevermos a sua implementação em pormenor, é de realçar as principais diferenças e especificar mais detalhadamente os objectivos deste trabalho.

À semelhança de Zibetti et al. (2016) desenvolvemos um modelo multi-agente

para investigar o sucesso da cooperação condicional num mundo virtual em que os recursos energéticos disponíveis para a sobrevivência são limitados. Mas ao contrário de Zibetti et al. (2016) os agentes não cooperativos nunca alteram a sua estratégia e a cooperação condicional baseia-se antes no conhecimento do comportamento de cada agente por experiência pessoal ou de outros agentes que transmitam essa informação. A memória é neste caso um registo pessoal ou colaborativo da identidade dos agentes cooperativos e não cooperativos na população, e a colaboração é permitida pela comunicação dessa informação, possibilitando assim a construção de uma rede de reciprocidade directa e indirecta que sustente a cooperação e promova as possibilidades sobrevivência de cada agente, exactamente como proposto pela teoria. Para avaliar a importância implícita dos aspectos cognitivos referidos compara-se o sucesso da cooperação incondicional e condicional isoladamente ou em competição com a estratégia não cooperativa em circunstâncias de pressão ecológica baixa, média e alta, considerando também o caso em que não há diferenças cognitivas entre agentes cooperativos e não cooperativos. Por fim estuda-se a dimensão de grupo em função do volume de memória.

Previu-se que o sucesso da cooperação deveria aumentar com a complexidade cognitiva e social.

## 2

## Métodos

## 2.1 O modelo

O modelo consiste na caracterização do mundo, dos objectos no mundo, dos agentes, da actividade dos agentes e interacções entre eles e os objectos, e das leis que governam estes aspectos. A implementação utiliza Netlogo (Figura 1). Para o objectivo proposto, todos os valores dos parâmetros apresentados foram definidos empiricamente de modo que as possibilidades de sobrevivência dos agentes sejam por um lado prejudicadas pelas circunstâncias ecológicas (quantidade inicial de recursos e velocidade de regeneração) e por outro promovidas por uma frequência de interacções suficientemente grande para permitir a reciprocidade, como exigido pela teoria. Deste modo será possível observar o efeito de mecanismos cognitivos pessoais e sociais - exigidos pela teoria - ao serviço da detecção do oportunismo e capitalização do esforço altruísta e observar os fenómenos emergentes. Note-se que apesar da teoria exigir também a especificação dos valores de  $B$ ,  $C$  e  $r$  ou  $w$  ou  $q$ , tal não é necessário uma vez que esta não é uma abordagem analítica, tal como não são necessárias quaisquer considerações sobre a ordem e o número de interacções entre cada par possível de agentes. Não se considera relações de parentesco nem conhecimento prévio do comportamento dos outros agentes, mas apenas que um grupo de agentes tem predisposição cooperativa e outro não cooperativa, e que o conhecimento emerge das interacções sociais permitindo aos agentes agir de acordo.

O *design* dos agentes é explícito. De acordo com Doran, Franklin, Jennings, e Norman (1997), em SMA a cooperação é uma propriedade das acções dos agentes envolvidos e ocorre quando as acções satisfazem uma das condições seguintes ou as duas em simultâneo: (i) tendem a cumprir um objectivo em comum com os outros agentes e que não podem cumprir sozinhos; (ii) tendem a cumprir os objectivos próprios e os dos outros agentes. Neste estudo, o objectivo de cada agente é sobreviver e o objectivo de cada agente cuja predisposição é cooperativa é que os outros agentes também sobrevivam. Por isso a noção de cooperação empregue é do tipo (ii). Não é do tipo (i) porque cada agente pode sobreviver sem cooperar. O tipo de agente pode ser classificado de acordo com o tipo de processos internos e regras de tomada de decisão. Nas experiências em que a cooperação é incondicional, o agente é do tipo reactivo. A cooperação ocorre irreflectidamente, sem previsão, planeamento ou

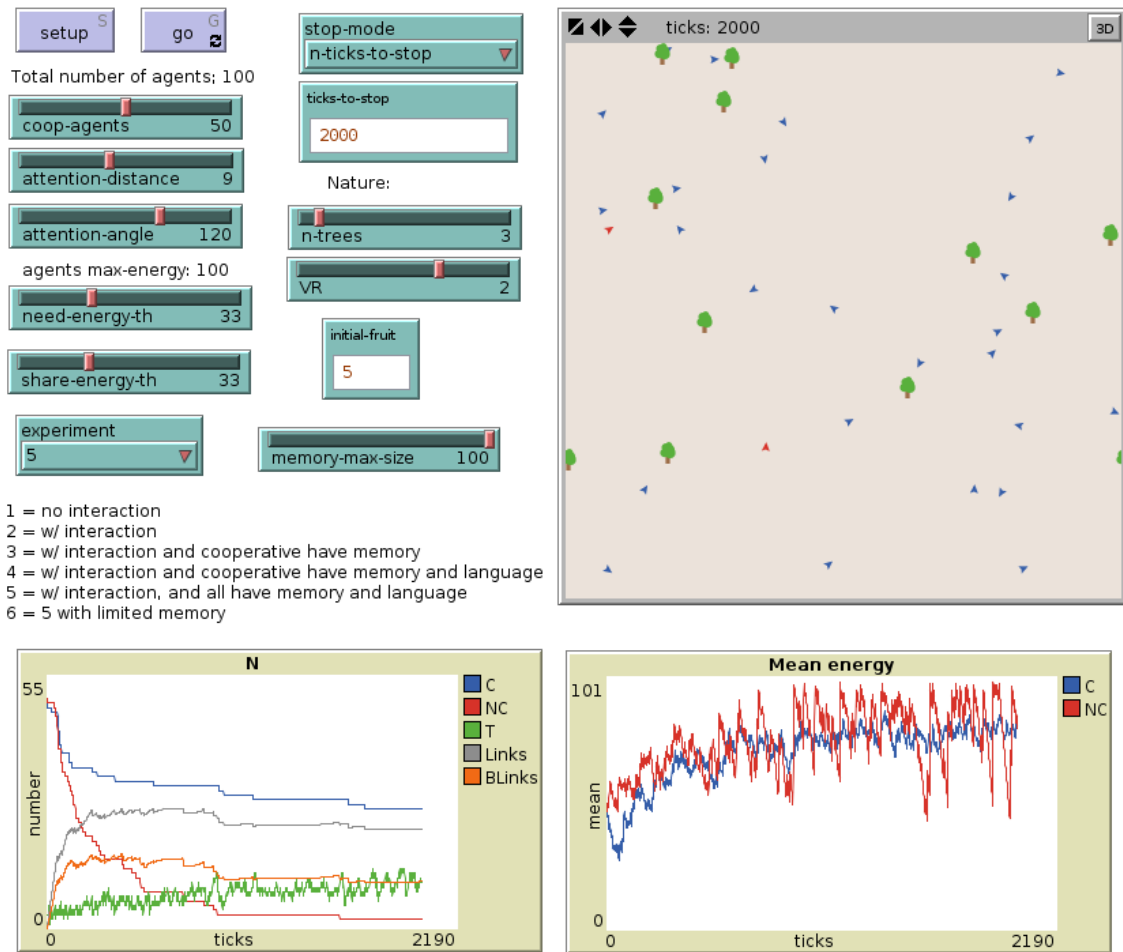


Figura 1: Implementação do modelo na plataforma Netlogo.

intenção. E nas experiências em que a cooperação é condicional, o agente é do tipo deliberativo e a cooperação subsequente ao conhecimento dos outros agentes é uma escolha de duas possíveis: cooperar ou não cooperar em função da informação sobre identidades e comportamentos armazenados na memória. A cooperação caracteriza-se de acordo com o grau de altruísmo da deliberação: (i) orientada exclusivamente por interesses pessoais, isto é, o agente coopera apenas quando isso serve ao seu objectivo; (ii) orientada por interesses parcial ou absolutamente altruístas, isto é, o agente coopera quando isso serve ao objectivo do grupo (em princípio do qual é membro), independentemente dos seus objectivos. De acordo com o *design* dos agentes, a cooperação é caracterizada pelo grau (ii) de altruísmo da deliberação.

## O mundo

O mundo é toroidal e tem dimensões  $51 \times 51$  *patches* (unidades de espaço bi-dimensional em Netlogo). Inicialmente existem 3 árvores (A) e 100 agentes, cooperativos (ACs) ou não cooperativos (ANCs). 50 a 100 agentes é o número típico em simulações multi-agente em estudos da cooperação por se considerar próximo do número de indivíduos em grupos de caçadores-recolectores (Nowak e Sigmund, 2005).

**Árvores** colocadas aleatoriamente no espaço.

- Com 5 frutos.
- Morrem quando o número de frutos é nulo.

**Agentes** colocados aleatoriamente no espaço.

- Inicialmente com uma energia aleatória entre 1 e 100.
- Perdem uma unidade de energia por unidade de deslocamento (passo).
- Se colhem um fruto de uma árvore adquirem energia máxima (100).
- Se perderem toda a energia morrem.
- Têm campo de visão definido por um ângulo atencional de  $120^\circ$  e uma distância atencional de 9 passos.
- Têm predisposição cooperativa ou não cooperativa. Os ANCs recusam sempre partilhar energia, e os ACs à partida aceitam mas se conhecem o agente que efectua o pedido, então, analogamente à estratégia TFT imitam o seu comportamento anterior.

A densidade inicial da população (P) e a densidade inicial de recursos (R) são definidas respectivamente pelo número de agentes e quantidade de recursos, e dimensão do mundo, que tal como os parâmetros de percepção, movimento, energia e interacção dos agentes foi estabelecida empiricamente, de modo que a frequência de interacções, como foi referido antes, permita compensar os efeitos adversos da pressão ecológica através da cooperação. Assim será possível avaliar a importância de mecanismos cognitivos para a cooperação com base na reciprocidade, como descrito. Para P e R diferentes, tal como para parâmetros diferentes da definição e actividade dos agentes, esperaria que, em muitos casos, a cooperação não fosse sustentável perante a pressão ecológica, e que, noutros, pelo contrário, não fosse sequer necessária.

Dadas as densidades P e R, ao contrário de Zibetti et al. (2016), neste estudo a pressão ecológica é determinada exclusivamente pela velocidade de regeneração da natureza VR. A cada *tick* (uma unidade de tempo em Netlogo) que satisfaz a equação  $(ticks \bmod 2 \times (2^{3-VR})) = 0$  nasce uma nova árvore com as características já definidas. Manipulando o valor de VR determina-se a pressão ecológica no sistema. Se por exemplo VR = 2, nasce uma árvore a cada 4 *ticks*, o que representa a condição de pressão ecológica média.

## Actividade do agente

- Movimenta-se aleatoriamente no espaço: a cada tick dá um passo numa direcção aleatória dentro do campo de visão.
- Se encontra uma árvore no campo da visão desloca-se na sua direcção. Se encontra várias árvores desloca-se na direcção da mais próxima. Colhe um fruto.
- Se encontra outros agentes no campo de visão e tem energia inferior a um terço da energia máxima efectua um pedido de energia a um qualquer que tenha mais energia e superior a um terço da energia máxima. Se o pedido for aceite a energia de ambos é somada e o total dividido pelos dois.
- Colher frutos é prioritário a interagir com outros agentes.

## Cognição do agente

Recorde-se que para o propósito deste estudo definiu-se a memória como um registo pessoal ou colaborativo da identidade dos agentes cooperativos e não cooperativos na população. A colaboração é permitida pela comunicação dessa informação. À semelhança de Enquist e Leimar (1993) designa-se de linguagem o mecanismo que o permite.

Quando um agente efectua um pedido de energia pode registar na memória a identidade e o comportamento do agente-alvo. Os ANCs são sempre não cooperativos, mas os ACs agem de acordo com a informação na memória à maneira da estratégia TFT. Numa interacção de partilha de energia, independentemente de quem efectua o pedido, os agentes envolvidos podem também partilhar a informação na memória. Nesse caso, a memória de cada um depois da interacção resulta da concatenação dos registos pessoais (anteriores à interacção) de identidades dos



agentes não cooperativos, privilegiando sempre o conhecimento por experiência pessoal. Deste modo os agentes podem conhecer o comportamento de outros agentes para além da experiência directa e agir de acordo.

Os agentes não têm memória da localização das árvores, não adaptam o movimento a outros agentes, não conhecem as propriedades dos outros agentes (excepto se preenchem os requisitos mínimos de energia para efectuar uma partilha), nem têm acesso a qualquer tipo de informação global (número de agentes, número de árvores, etc).

Em síntese considera-se três tipos cognitivos:

**0** sem memória e sem linguagem

**M** memória

**ML** memória e linguagem

Sempre que se usar a notação  $XsY$  refere-se os agentes com predisposição  $X$  e do tipo cognitivo  $Y$ . Por exemplo:  $XsML$  são todos os agentes com qualquer predisposição e com memória e linguagem, e  $ACsM$  todos os agentes com predisposição cooperativa e com memória.

## 2.2 Configuração das experiências

A experiência 1 (E1) é um estudo independente do número de sobreviventes em duas populações: uma em que todos os agentes são cooperativos e outra em que nenhum coopera, nas três condições de pressão ecológica: alta ( $VR = 1$ ), média ( $VR = 2$ ) e baixa ( $VR = 3$ ). Como não há mistura de estratégias, é irrelevante o tipo cognitivo que se considera. Por defeito, considera-se o tipo 0. Nesta experiência tem-se um total de 6 configurações diferentes. Nesta experiência e em todas as outras, cada configuração é executada 100 vezes. A média e o desvio padrão do número de sobreviventes são calculados para cada configuração.

Nas experiências 2 a 5 (E2 a E5) selecciona-se a condição de pressão ecológica média e considera-se populações mistas e uniformes:  $Xs0$  na E2,  $ACsM$  e  $ANCs0$  na E3,  $ACsML$  e  $ANCs0$  na E4 e  $XsML$  na E5. A média e o desvio padrão do número de  $ACs$ ,  $ANCs$  e árvores são calculados a cada 200 *ticks*. Por outras palavras, as experiências 2 a 4 estudam o sucesso da cooperação incondicional (E2) e condicional baseada na reciprocidade directa (E3) ou indirecta (E4) em competição com a estratégia não cooperativa. A E5 estuda também o sucesso da cooperação baseada na

reciprocidade mas na ausência de diferenças cognitivas entre agentes cooperativos e não cooperativos. Para ilustrar e comparar qualitativamente as redes de reciprocidade directa da E3 e reciprocidade directa e indirecta da E4, nestas experiências observa-se também as relações activas que se mantêm entre os agentes ao final das simulações. Defina-se relações activas como aquelas que foram iniciadas por um pedido de energia e não foram cortadas por uma eventual rejeição subsequente.

A experiência 6 (E6) contempla as condições de pressão ecológica média e alta e populações mistas mas não uniformes. Neste caso, considera-se também os 4 tipos de população já estudados nas experiências 2 a 5 mas em 9 condições iniciais diferentes definidas pelo número inicial de ACs  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 80, 90$  e restantes ANCs. Um total de 72 configurações.

Defina-se o sucesso da cooperação como

$$s = \frac{\text{número de sobreviventes cooperativos}}{\text{número total de sobreviventes}},$$

este número é obtido de cada execução e a média  $S$  calculada para cada configuração. Se for superior a 0.5 considera-se que a cooperação é bem sucedida. Esta experiência investiga as condições gerais para o sucesso da cooperação.

Até agora considerou-se na configuração das experiência que o volume de memória dos agentes é adequado à dimensão da população inicial. A experiência 7 (E7) investiga a dimensão do grupo de sobreviventes em função do volume de memória  $M = 0, 10, \dots, 90, 100$  em todas as condições de pressão ecológica, sendo a memória neste caso particular um registo dos agentes conhecidos, em vez de um registo dos ANCs. Para tal considera-se que toda a população inicial é cooperativa (ACsM) e que quando um agente atinge o limite de memória passa a ignorar futuros pedidos de partilha de energia por agentes que não sejam conhecidos. São 30 configurações. A média e o desvio padrão do número de sobreviventes são calculados para cada configuração

Todas as configurações de todas as experiências são executadas até aos 2000 *ticks*, quando a tendência para estabilizar se torna mais evidente.

Dado o *design* dos agentes e a modelação do mundo, e de todos os aspectos já referidos, para cada experiência faz-se uma previsão inicial sobre as possibilidades da cooperação. Haverá casos em que é ineficiente devido a efeitos não considerados pelos agentes, como a ausência de reciprocidade, e outros em que esse problema tende a ser corrigido.

## 3

## Experiências

### 3.1 E1: todos cooperam *vs* ninguém coopera

Da lógica do modelo desenvolvido, podemos esperar que quanto mais alta a pressão ecológica, menor o volume de energia disponível no sistema, maiores as necessidades energéticas dos agentes e maior a quantidade de pedidos de partilha de energia, pelo que no caso da população cooperativa a pressão ecológica deve promover a cooperação. Podemos, por isso, esperar que o sucesso da população cooperativa seja superior ao sucesso da população não cooperativa.

#### Resultados da E1

Em todas as condições o número (N) de sobreviventes da população cooperativa é superior ao número de sobreviventes da população não cooperativa (Figura 2): quando  $VR = 1$ ,  $M_C = 17.620$ ,  $SD_C = 2.912$  e  $M_{NC} = 11.300$  e  $SD_{NC} = 0.948$ ; quando  $VR = 2$ ,  $M_C = 61.720$ ,  $SD_C = 2.547$  e  $M_{NC} = 22.610$  e  $SD_{NC} = 1.490$ ; quando  $VR = 3$ ,  $M_C = 99.740$ ,  $SD_C = 0.567$  e  $M_{NC} = 42.810$  e  $SD_{NC} = 1.796$ . Em ambos os casos, o número de sobreviventes cresce em função da velocidade de regeneração.

#### Discussão da E1

A estratégia de cooperação é a mais eficaz. Nas três condições de pressão ecológica sobrevivem mais ACs porque estes adoptam uma estratégia de sobrevivência colectiva promovendo as possibilidades de sobrevivência de cada agente através da redistribuição constante de energia quando necessário, ao contrário dos ANC's, que adoptam uma estratégia de sobrevivência individual. Enquanto estes têm apenas as árvores como fonte exclusiva de energia, os ACs têm também os outros agentes como fonte de energia alternativa, com a vantagem implícita de que é móvel. Em todo o caso, quanto maior a velocidade de regeneração da natureza, maior a facilidade de acesso a recursos energéticos, por isso o número de sobreviventes aumenta com a diminuição da pressão ecológica qualquer que seja a estratégia empregue. O resultado principal é que: todos cooperarem é melhor do que ninguém cooperar.

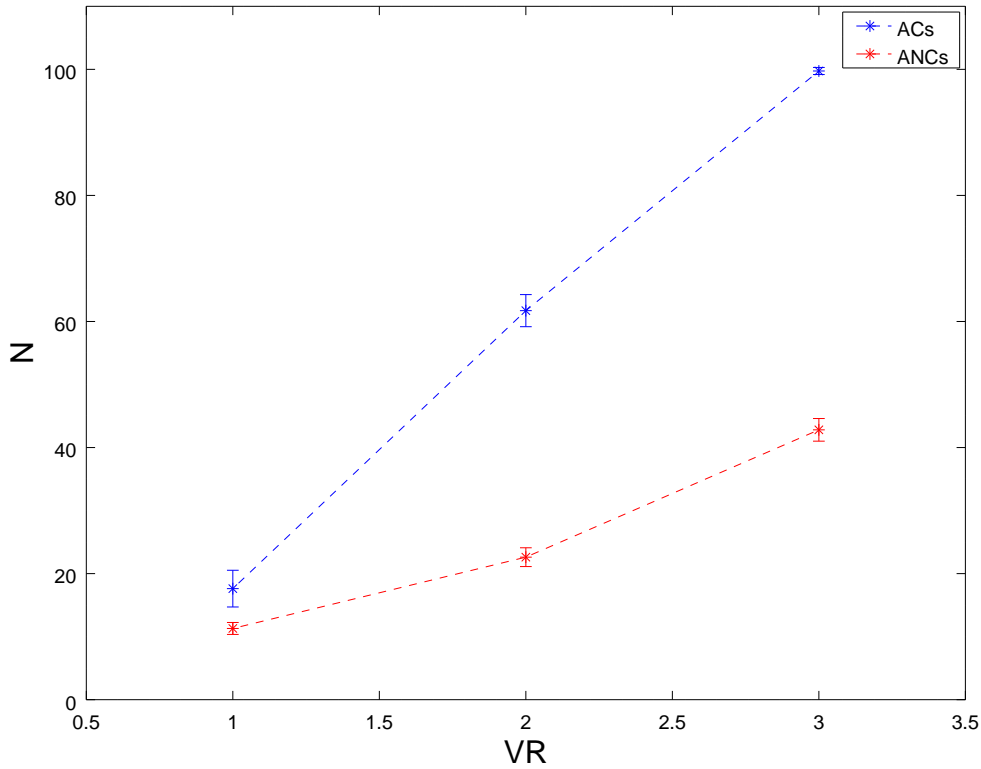


Figura 2: (E1) Estudo independente do número de sobreviventes das populações cooperativa e não cooperativa considerando as três velocidades de regeneração da natureza: baixa, média e alta.

Pela capacidade de distribuição constante dos recursos energéticos disponíveis no sistema, a estratégia cooperativa isolada promove as possibilidades de sobrevivência de cada agente. É relevante compreender se é capaz de resistir e sobreviver à exploração oportunista num meio competitivo. A experiência seguinte investiga essa questão.

### 3.2 E2: o problema da cooperação incondicional

Podemos desde já supor que se os ACs aceitam sempre partilhar energia e os ANCs recusam sempre esse pedido, então, os ANCs que exploram os ACs como segundo recurso de energia têm, neste caso, vantagens competitivas.

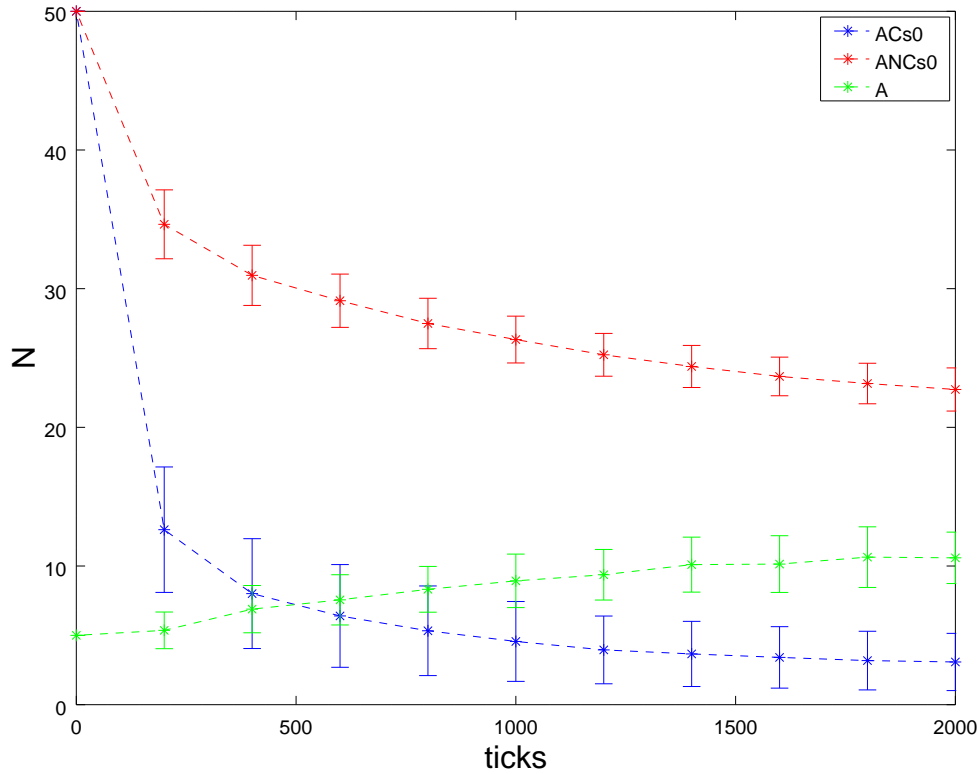


Figura 3: (E2) Evolução temporal das populações cooperativa e não cooperativa em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores.

## Resultados da E2

O número inicial de ACs sofre um decréscimo acentuado, maior do que o número de ANCs, e no final ambas as populações tendem a estabilizar, com o número de ANCs ( $M_{NC} = 22.730$ ,  $SD_{NC} = 1.556$ ) superior ao número de ACs ( $M_C = 3.08$ ,  $SD_C = 2.063$ ). O número de árvores tende a aumentar e a estabilizar no final ( $M_A = 10.590$ ,  $SD_A = 1.854$ ) (Figura 3).

## Discussão da E2

Neste caso o oportunismo compensa: o número de ANCs que sobrevive no final é superior ao número de ACs que sobrevive. Como os ANCs têm os ACs como fonte de energia alternativa às árvores beneficiam igualmente do suporte social constituído pela população cooperativa, que pelo facto de redistribuir continuamente e incondicionalmente a sua energia acaba por sacrificar-se reduzindo as próprias possibilidades

de sobrevivência - compare-se o número de sobreviventes cooperativos com o caso em que toda a população é cooperativa (E1,  $VR = 2$ ). Neste caso é inferior. As populações tendem para a coexistência estável, mas sob o domínio dos egoístas. Podemos supor que, se a população cooperativa se extinguisse, o número de ANCs que sobreviveria seria mais baixo do que o actual devido à ausência do suporte social oferecido pela população cooperativa. Mas tal não acontece porque o sistema tende para o equilíbrio da regeneração e consumo de recursos energéticos. Isto é, sendo certo que à partida os recursos para sustentar a dimensão inicial da população são limitados e que por isso a população diminui, o decréscimo consequente do consumo permite a “expansão da floresta” à velocidade constante de regeneração do número de árvores. Por isso o número de árvores tende a sustentar toda a população. O resultado principal é que não cooperar é a melhor opção quando há uma parte da população que coopera incondicionalmente.

Significa isto que a cooperação está condenada?

### 3.3 E3: reciprocidade directa

Nesta experiência os ACs têm memória das interacções passadas. A memória é um registo pessoal da identidade dos outros agentes e do seu comportamento aquando um pedido de energia, pelo que permite reconhecê-los em eventuais interacções futuras, manter a cooperação com os agentes altruístas e rejeitar pedidos de outros que tenham demonstrado egoísmo. Espera-se que esta estratégia permita à população cooperativa resistir à exploração do oportunismo promovendo as possibilidades de sobrevivência dos ACs. O equilíbrio regeneração-consumo acabado de descrever (na E2) é naturalmente expectável qualquer que seja o tipo de agente considerado, e portanto previsto nesta e em todas as experiências estudadas daqui para a frente.

### Resultados da E3

Os resultados são semelhantes aos da experiência anterior com as diferenças de que o número de ACs sobreviventes é superior ( $M_C = 7.650$ ,  $SD_C = 3.932$ ) e o número de ANCs inferior ( $M_{NC} = 18.120$ ,  $SD_{NC} = 2.528$ ). O número final de árvores é praticamente o mesmo ( $M_A = 10.910$ ,  $SD_A = 1.843$ ) (Figura 4).

O grafo da figura 5 exemplifica a situação final da rede de reciprocidade directa: a população não-cooperativa é dominante, nem todos os ACs se conhecem entre eles e nem todos os ANCs foram ainda identificados e excluídos da rede.

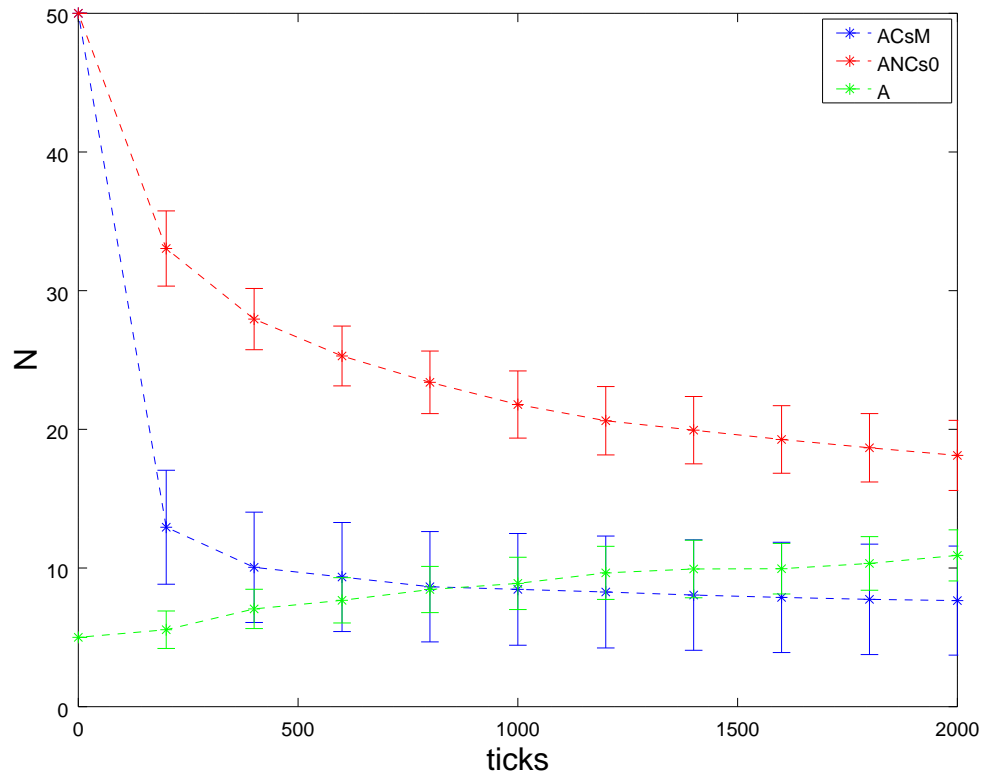


Figura 4: (E3) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos com memória e não cooperativos em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores.

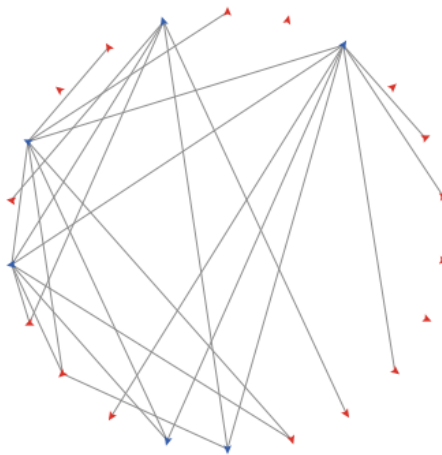


Figura 5: (E3 - rede) Grafo exemplo da situação final da rede de reciprocidade directa na condição de pressão ecológica média.

## Discussão da E3

Tal como na experiência anterior, a população não-cooperativa explora e domina a população cooperativa, contudo, neste caso, a cooperação é condicional e resiste melhor do que a cooperação incondicional pela possibilidade de reconhecer outros agentes de interações passadas e agir de acordo com o seu comportamento, passando a responder negativamente a pedidos de energia por agentes que tenham sido egoístas. Isto é, emerge uma rede de reciprocidade directa. No intervalo de tempo das simulações é difícil que todos os ACs interajam com todos os ANC's e passem a conhecer o seu comportamento: repare-se que alguns ANC's mantêm relações com ACs (Figura 5) porque, apesar de já terem interagido com estes através de um pedido próprio de energia, ainda não lhes foi feito nenhum pedido por estes agentes, que, com certeza, rejeitariam denunciando-se. Resumindo, a cooperação condicional baseada na reciprocidade directa permitida pela memória e reconhecimento subsequente é uma estratégia de resistência pessoal que leva ao isolamento progressivo da população cooperativa - um fenómeno emergente de defesa da estratégia colectiva de sobrevivência que deixa de servir de suporte social a agentes oportunistas.

Ainda assim o sucesso da cooperação é inferior ao sucesso da não cooperação. Que outros benefícios há por explorar numa rede social?

## 3.4 E4: reciprocidade directa e indirecta

Nesta experiência os ACs têm também linguagem e podem trocar informação sobre a sua experiência passada (e em segunda mão) com outros agentes de modo a controlar o oportunismo. Sempre que participam numa interacção de partilha de energia, os ACs trocam também informação sobre agentes que tenham sido egoístas, pelo que essa informação pode circular na rede sem necessidade de experiência directa. Espera-se que esta possibilidade cognitiva e social adicional se traduza num isolamento mais rápido da população cooperativa e numa promoção considerável das possibilidades de sobrevivência dos ACs.

## Resultados da E4

Nestas simulações a população cooperativa estabiliza bastante mais cedo e o número de ACs é sempre superior ao número de ANC's que é sempre decrescente (Figura 6). No final, o número ACs ( $M_C = 25.030$ ,  $SD_C = 6.675$ ) é superior ao número de ANC's ( $M_{NC} = 5.670$ ,  $SD_{NC} = 3.223$ ). O número final de árvores ( $M_A = 9.280$ ,



$SD_A = 1.912$ ) permanece semelhante.

O grafo da figura 7 exemplifica a situação final da rede de reciprocidade directa e indirecta: a população cooperativa é dominante, o número de relações activas muito superior à experiência anterior e praticamente todos os ANCs foram excluídos da rede social.

## Discussão da E4

O aumento das possibilidades de sobrevivência dos ACs é considerável e deve-se à identificação social dos oportunistas. É claro que a rede de reciprocidade emerge muito rapidamente, e ainda que nem todos os ACs se conheçam entre eles a tendência para a exclusão dos ANCs e o isolamento das populações é muito evidente. Tal demonstra a emergência de uma estratégia de resistência colectiva contra o oportunismo com base na memória e na linguagem para a troca de informação social, que garante a estabilidade e o sucesso superior da cooperação.

Estratégias de cooperação condicionais como as descritas até agora só podem evoluir em coexistência com oportunismo “à altura” como sugerido por Enquist e Leimar (1993), caso contrário não têm qualquer vantagem adaptativa e possibilidades de selecção natural. Por este motivo não queremos negligenciar o estudo da cognição da não-cooperação. Se os ANCs tiverem as mesmas possibilidades cognitivas aqui exploradas, então como veremos, a rede social serve também ao oportunismo. De seguida investigam-se as consequências que representam a ausência de diferenças cognitivas entre ACs e ANCs.

## 3.5 E5: reciprocidade sem diferenças cognitivas

Nesta experiência os ANCs podem também memorizar a identidade e o comportamento de outros agentes e comunicar essa informação. A implicação disto, é que se um AC C1 não tem experiência pessoal ou não esteja informado do comportamento de outro AC C2, ele pode receber informação negativa sobre C2 caso este já tenha recusado ajudar um ANC NC depois de o identificar ou receber informação negativa sobre NC. Nesta implementação do modelo os agentes não transmitem informação sobre eles próprios e privilegiam sempre a experiência pessoal, o que permite também corrigir informação negativa caso por exemplo C1 faça um pedido a C2 e este responda positivamente.

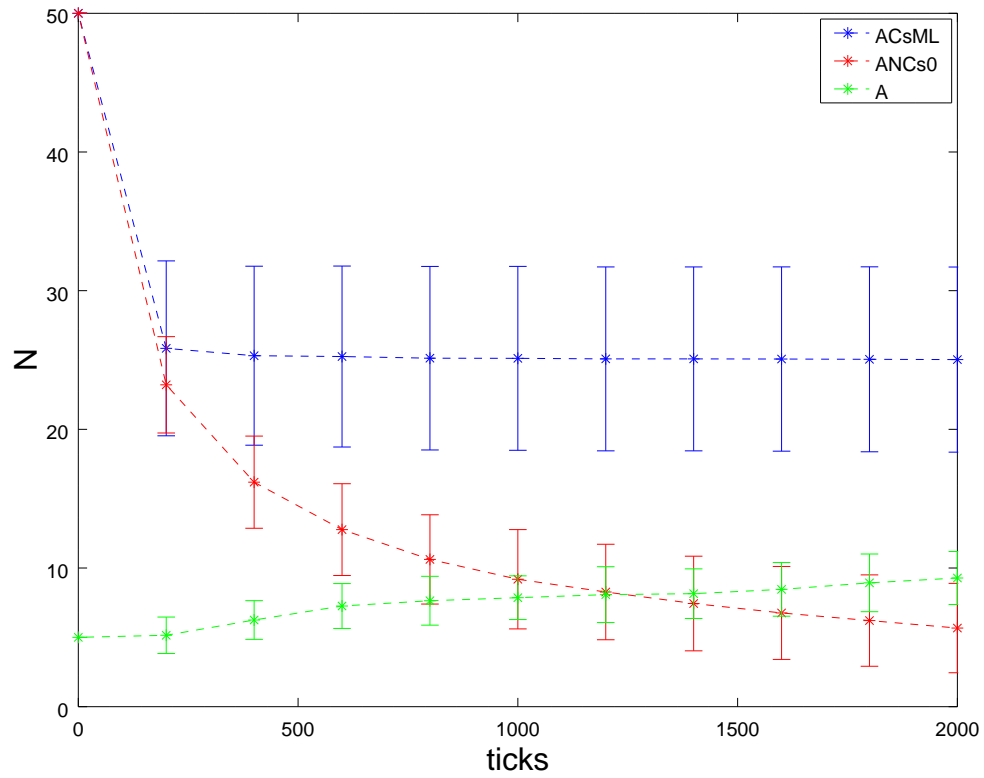


Figura 6: (E4) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos com memória e linguagem e não cooperativos em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores.

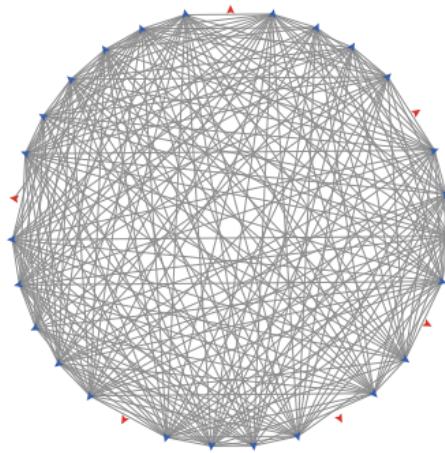


Figura 7: (E4 - rede) Grafo exemplo da situação final da rede de reciprocidade directa e indirecta na condição de pressão ecológica média.

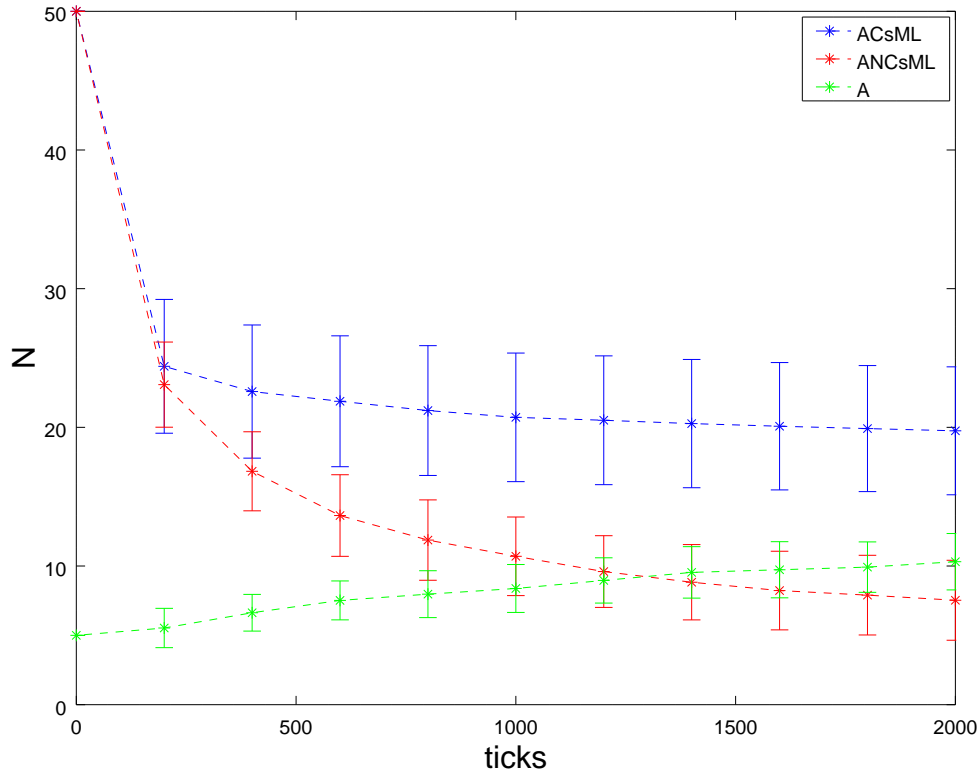


Figura 8: (E5) Evolução temporal das populações de agentes cooperativos e não cooperativos com memória e linguagem, em competição por recursos energéticos na condição de pressão ecológica média. E variação do número total de árvores.

## Resultados da E5

Os resultados são parecidos aos da experiência anterior com as diferenças de que a tendência para a estabilização da cooperação é mais lenta (Figura 8). O número de ACs que sobrevive é inferior ( $M_C = 19.750$ ,  $SD_C = 4.613$ ) e o número de ANCs que sobrevive é superior ( $M_{NC} = 7.530$ ,  $SD_{NC} = 2.883$ ). O número de árvores permanece semelhante ( $M_A = 10.310$ ,  $SD_A = 2.034$ ).

## Discussão da E5

A circulação de informação negativa em cadeia pelo processo descrito prejudica ligeiramente a população cooperativa. Ainda assim, a cooperação é também neste caso mais bem sucedida que a não cooperação. Repare-se que os ANCs também fazem circular informação negativa sobre outros ANCs com quem tenham tido contacto. Os ACs também fazem circular informação negativa sobre outros ACs caso

não tenham experiência pessoal destes mas têm a possibilidade de corrigir informação falsa sobre si que esteja a circular, possibilidade que os ANCs não têm. A menos que possam alterar o seu comportamento, o que não é o caso. É interessante notar que mesmo que ambos os tipos tenham as mesmas possibilidades cognitivas, o sucesso da cooperação é superior ao caso em que apenas os ACs têm memória (sem linguagem). A diferença importante é que a sociedade facilita a cooperação mesmo quando facilita certos aspectos do oportunismo

Até agora considerámos uma distribuição inicial uniforme de ACs e ANCs na condição de pressão ecológica média e verificámos que a cooperação é promovida pela cognição e facilitada pela sociedade. É pertinente questionar se estas interpretações permanecem válidas alterando as condições iniciais de número de ACs no sistema e pressão ecológica, e em particular quando estes factores são mais adversos à sobrevivência da população cooperativa.

### 3.6 E6: condições para o sucesso da cooperação

Nesta experiência pretende-se analisar o sucesso da cooperação em termos da complexidade cognitiva e da quantidade inicial de ACs  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$ , permitindo perceber quais são as condições necessárias aproximadas para o sucesso superior da cooperação nas condições de pressão ecológica média (E6a) e alta (E6b).

#### Resultados da E6

Em todas as configurações na região  $S > 0.5$  a cooperação é bem sucedida. Na condição de pressão ecológica média (Figura 9) o sucesso da cooperação aumenta com a complexidade cognitiva. Excepto quando  $C_{ini} \geq 40$  no tipo de população XsML, em que decresce relativamente ao tipo ACsML & ANCs0. Ainda assim, o valor de  $S$  no tipo XsML é superior ao valor de  $S$  no tipo ACsM & ANCs0 em todas as configurações. Apenas as configurações  $C_{ini} \geq 80$  são bem sucedidas no tipo Xs0. No tipo ACsM & ANCs0, quando  $C_{ini} \geq 60$  todas as configurações são bem sucedidas e o mesmo se verifica quando  $C_{ini} \geq 40$  no tipo ACsML & ANCs0 e quando  $C_{ini} \geq 50$  no tipo XsML.

Na condição de pressão ecológica alta (Figura 10) o sucesso da cooperação também aumenta com a complexidade cognitiva, como era de esperar. Excepto quando  $C_{ini} = 50, 60, 80$  e  $90$  no tipo XsML. Ainda assim, em todos os casos e como anteriormente,  $S(\text{XsML}) > S(\text{ACsM \& ANCs0})$  em todas as configurações. Neste caso, só

são bem sucedidas as configurações definidas por  $C_{ini} = 90$  nos tipos Xs0 e ACsM & ANC0,  $C_{ini} \geq 60$  no tipo ACsML & ANC0 e  $C_{ini} \geq 70$  no tipo XsML.

As tabelas 2 e 3 mostram os valores da média e desvio padrão de S para cada configuração nas condições de pressão ecológica média e alta respectivamente.

## Discussão da E6

O sucesso da cooperação é tanto maior quanto maior o número inicial de ACs. Para números iniciais de ACs muito reduzidos, o sucesso da cooperação é em geral também reduzido, mas quando a população cooperativa inicial é maior ou dominante torna-se também mais fácil encontrar outros agentes com a mesma predisposição, o que compensa o esforço cooperativo próprio. O sucesso da cooperação no tipo Xs0 quando  $C_{ini} \geq 80$  na condição VR = 2 e quando  $C_{ini} \geq 90$  na condição VR = 1 deve-se à elevada capacidade da população cooperativa de sustentar toda a população mesmo quando explorada por um número reduzido de oportunistas. A memória por permitir resistir ao oportunismo demonstra vantagens relativamente à ausência dela, e no caso em que os agentes podem trocar informação essa vantagem é consideravelmente maior. As vantagens permitidas pela cognição são potenciadas não só por números iniciais mais elevados de ACs mas também pela construção de uma rede de reciprocidade como visto em experiências anteriores.

Na condição VR = 2, o sucesso dos casos em que a população não-cooperativa é dominante ou igual à cooperativa ( $C_{ini} = 40$  no tipo ACsML & ANC0 e  $C_{ini} = 50$  no tipo XsML) é justificado pelas vantagens cognitivas descritas, mesmo quando os ANC0s podem também partilhar informação. Na condição VR = 1, essas vantagens só são valiosas se a população cooperativa ao início é a maior parte da população total ( $C_{ini} \geq 60$  no tipo ACsML & ANC0 e  $C_{ini} \geq 70$  no tipo XsML). No tipo XsML, apesar de várias configurações não serem bem sucedidas, a população cooperativa beneficia da informação que circula entre ANC0s que se denunciam uns aos outros.

Recorde-se ainda que se no tipo XsML um agente cooperativo C1 se recusa a ajudar um agente não-cooperativo NC, NC identifica C1 como não cooperativo e transmite essa informação em eventuais interações futuras, que caso ocorram com outros agentes cooperativos, por exemplo C2, C3 e C4, implicam que C1 seja indirectamente excluído da rede social e assim prejudicado nas suas possibilidades de sobrevivência (repare-se que C2, C3 e C4 podem ainda transmitir essa informação a outros Cs). Situação que só pode ser corrigida caso C2, C3, C4 e outros eventuais Cs que estejam mal informados façam pedidos de energia a C1, que naturalmente

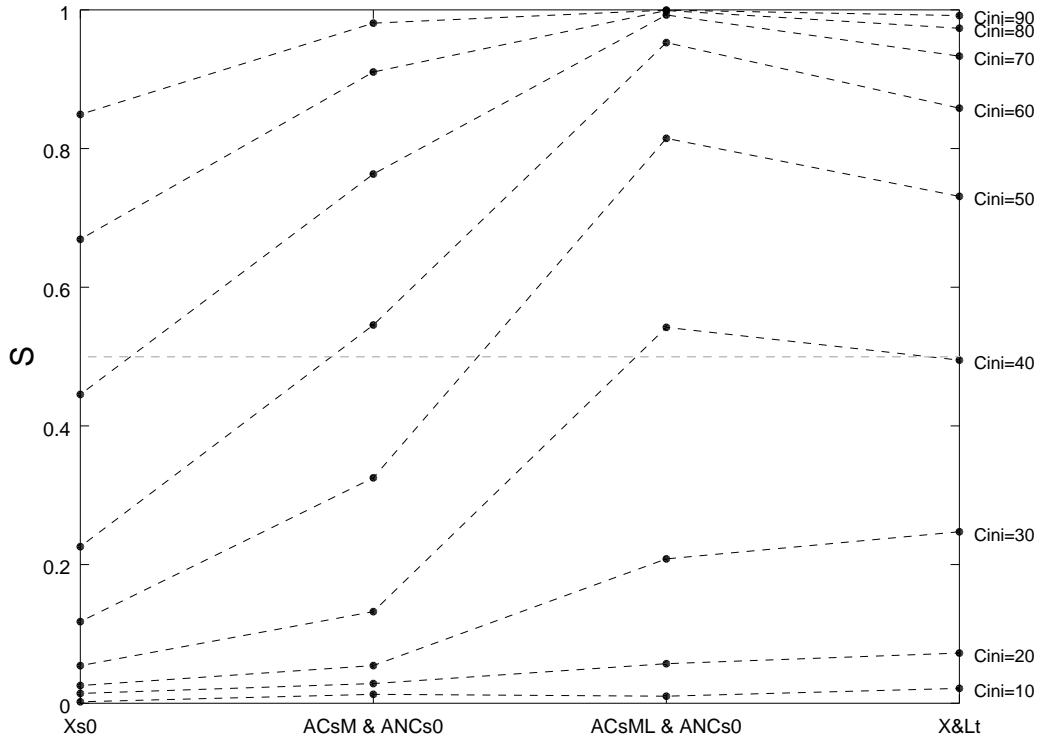


Figura 9: (E6a) Sucesso da cooperação em função da complexidade cognitiva nas configurações iniciais definidas por  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$  e na condição de pressão ecológica média.

$C_{ini}$	Xs0	ACsM & ANCso	ACsML & ANCso	XsML
10	$0.002 \pm 0.009$	$0.012 \pm 0.023$	$0.010 \pm 0.023$	$0.021 \pm 0.032$
20	$0.014 \pm 0.023$	$0.028 \pm 0.038$	$0.057 \pm 0.070$	$0.072 \pm 0.075$
30	$0.025 \pm 0.030$	$0.054 \pm 0.055$	$0.208 \pm 0.136$	$0.247 \pm 0.136$
40	$0.054 \pm 0.052$	$0.132 \pm 0.084$	$0.542 \pm 0.162$	$0.494 \pm 0.154$
50	$0.117 \pm 0.076$	$0.325 \pm 0.140$	$0.814 \pm 0.132$	$0.731 \pm 0.145$
60	$0.225 \pm 0.083$	$0.545 \pm 0.123$	$0.952 \pm 0.059$	$0.858 \pm 0.109$
70	$0.445 \pm 0.074$	$0.763 \pm 0.114$	$0.992 \pm 0.014$	$0.933 \pm 0.065$
80	$0.669 \pm 0.042$	$0.910 \pm 0.058$	$0.999 \pm 0.004$	$0.973 \pm 0.032$
90	$0.849 \pm 0.021$	$0.980 \pm 0.025$	$0.999 \pm 0.002$	$0.991 \pm 0.015$

Tabela 2: (E6a) Média  $\pm$  desvio padrão do sucesso da cooperação em cada população nas configurações iniciais definidas por  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$  e na condição de pressão ecológica média.

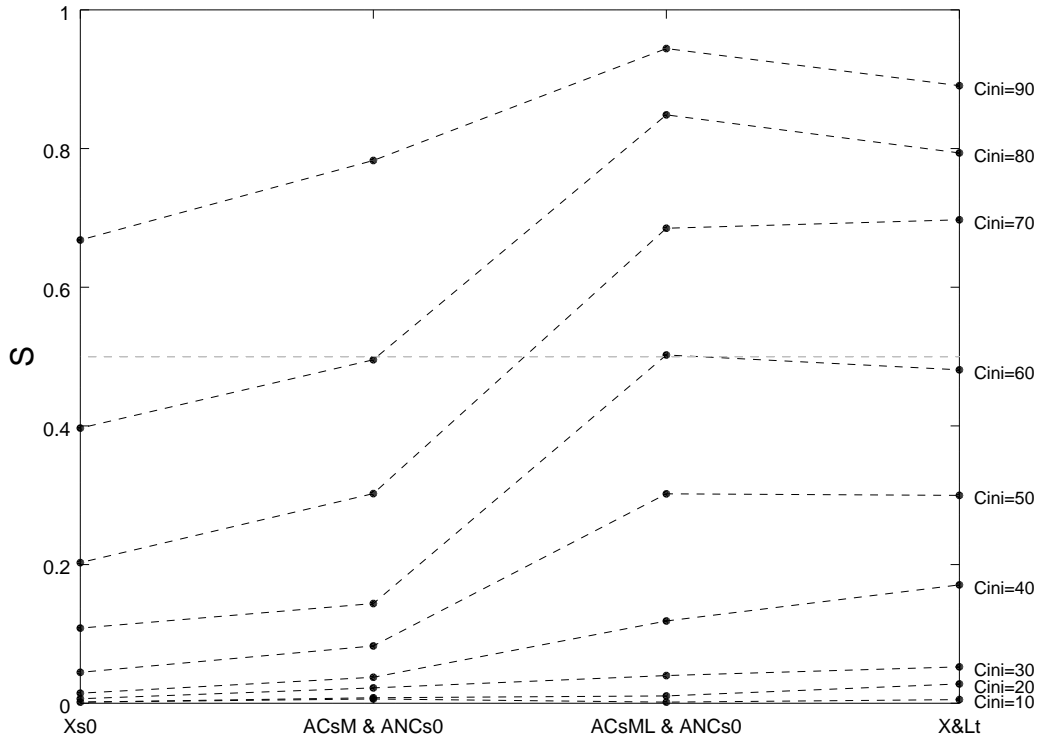


Figura 10: (E6b) Sucesso da cooperação em função da complexidade cognitiva nas configurações iniciais definidas por  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$  e na condição de pressão ecológica alta.

$C_{ini}$	Xs0	ACsM & ANCso	ACsML & ANCso	XsML
10	$0.001 \pm 0.011$	$0.006 \pm 0.022$	$0.001 \pm 0.011$	$0.005 \pm 0.020$
20	$0.001 \pm 0.011$	$0.007 \pm 0.025$	$0.010 \pm 0.031$	$0.027 \pm 0.050$
30	$0.006 \pm 0.024$	$0.022 \pm 0.038$	$0.039 \pm 0.068$	$0.052 \pm 0.080$
40	$0.014 \pm 0.036$	$0.037 \pm 0.056$	$0.118 \pm 0.124$	$0.170 \pm 0.168$
50	$0.044 \pm 0.055$	$0.082 \pm 0.078$	$0.302 \pm 0.202$	$0.299 \pm 0.208$
60	$0.108 \pm 0.088$	$0.143 \pm 0.128$	$0.502 \pm 0.220$	$0.480 \pm 0.231$
70	$0.202 \pm 0.125$	$0.302 \pm 0.162$	$0.685 \pm 0.194$	$0.697 \pm 0.178$
80	$0.396 \pm 0.138$	$0.495 \pm 0.160$	$0.848 \pm 0.141$	$0.793 \pm 0.140$
90	$0.668 \pm 0.123$	$0.782 \pm 0.118$	$0.944 \pm 0.088$	$0.890 \pm 0.121$

Tabela 3: (E6b) Média  $\pm$  desvio padrão do sucesso da cooperação em cada população nas configurações iniciais definidas por  $C_{ini} = 10, 20, \dots, 90$  e na condição de pressão ecológica alta.

responde positivamente (caso nenhum deles esteja também excluído da rede) como descrito anteriormente. Por este motivo, ao aumento de  $C_{ini}$  corresponde também um aumento da circulação de informação falsa, pelo que, o sucesso da cooperação pode decrescer relativamente ao tipo ACsML & ANCs0. Efeito que é atenuado quando o número inicial de ACs  $\rightarrow 100$ .

É importante notar que apesar das configurações na região  $S > 0.5$  permitirem o sucesso da cooperação nem todas elas o garantem. De facto, como mostram as tabelas 2 e 3, o desvio padrão do sucesso das configurações definidas por  $C_{ini} = 60$  no tipo ACsM & ANCs0 e com  $VR = 2$ ,  $C_{ini} = 40$  no tipo ACsML & ANCs0 e com  $VR = 2$  e  $C_{ini} = 60$  e  $70$  no tipo ACsML & ANCs0 e com  $VR = 1$  intersecta o limite  $S = 0.5$ . Pela mesma razão, algumas configurações na região  $S < 0.5$  podem permitir o sucesso da cooperação, nomeadamente aquelas definidas por:  $C_{ini} = 70$  no tipo Xs0 no tipo  $VR = 2$ ,  $C_{ini} = 40$  no tipo XsML e com  $VR = 2$ ,  $C_{ini} = 80$  no tipo Xs0 e ACsM & ANCs0 e com  $VR = 1$ ,  $C_{ini} = 50$  no tipo ACsML & ANCs0 e com  $VR = 1$  e  $C_{ini} = 60$  e  $50$  no tipo XsML e com  $VR = 1$ .

Nestas experiências verifica-se mais uma vez que o sucesso da cooperação aumenta com a complexidade cognitiva, e que na ausência de diferenças cognitivas é superior à condição em que apenas os ACs têm memória, independentemente da pressão ecológica. O resultado principal é que as mesmas capacidades cognitivas em sociedade é melhor para a cooperação do que vantagens cognitivas individuais sem sociedade. A sociedade faz a diferença de sucesso.

### 3.7 E7: dimensão de grupo e memória

Nesta experiência estuda-se a dimensão final de uma população cooperativa em função do volume de memória  $M = 0, 10, \dots, 90, 100$  que os agentes possuem, em todas as condições de pressão ecológica. Quando o limite de memória de agentes conhecidos é atingido, os agentes ignoram interações futuras que não aconteçam com agentes conhecidos. Espera-se que a dimensão de grupo aumente em função do volume de memória em todas as condições.

#### Resultados da E7

Nas três condições de pressão ecológica a dimensão do grupo aumenta logisticamente em função da memória (Figura 11). A variação é mais pronunciada nos casos de



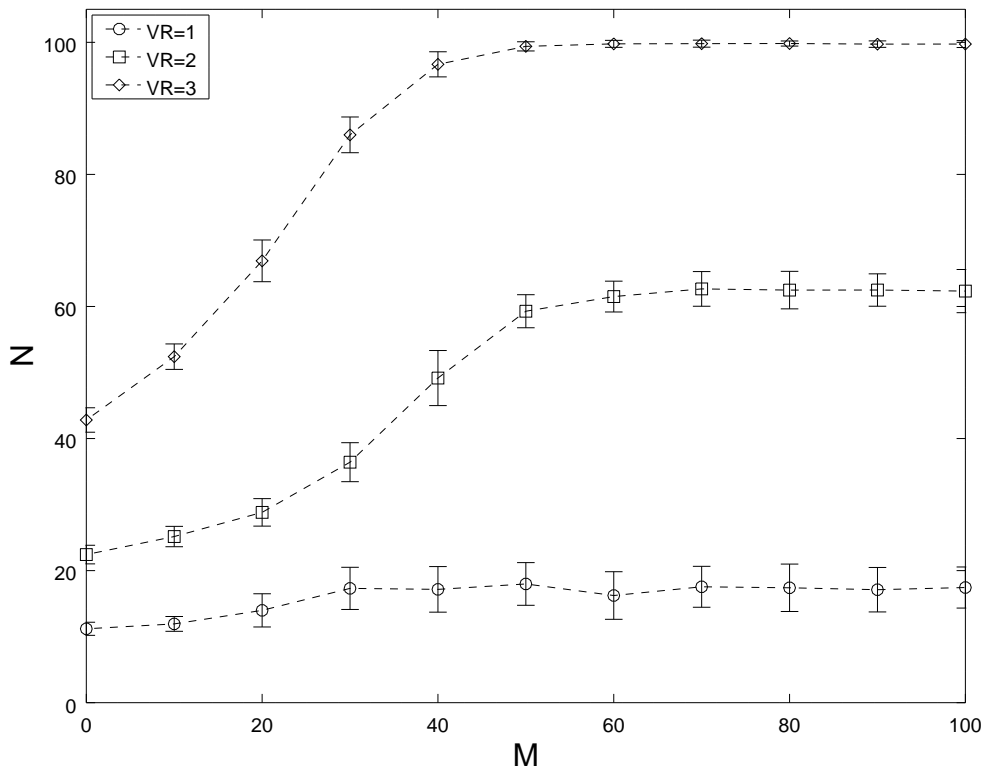


Figura 11: (E7) Dimensão de grupo em função da memória  $M = 0, 10, 20, \dots, 90$  ao final das simulações e em todas as condições de pressão ecológica.

pressão média e alta. Ao final das simulações, quando  $VR = 1$ ,  ${}^1M_0 = 11.190$ ,  $SD_0 = 0.992$  e  ${}^2M_{100} = 17.440$  e  $SD_{100} = 0.3112$ , quando  $VR = 2$ ,  $M_0 = 22.430$ ,  $SD_0 = 1.409$  e  $M_{100} = 62.330$  e  $SD_{100} = 3.269$ , e quando  $VR = 3$ ,  $M_0 = 42.810$ ,  $SD_0 = 1.852$  e  $M_{100} = 99.740$  e  $SD_{100} = 0.525$ .

## Discussão da E7

Para esta experiência assumiu-se que se um agente atingisse o limite de memória passaria a ignorar interações futuras com desconhecidos. Por isso, quando nenhum agente pode ser recordado a cooperação é impossível. Por outro lado, quando todos os agentes podem ser recordados a cooperação é possível entre todos. Compare-se estes resultados com os resultados da experiência 1. Nos casos extremos em que  $M = 0$  e  $M = 100$  os resultados de ambas as experiências são idênticos, como seria de

<sup>1</sup>O índice 0 indica que os agentes não têm memória

<sup>2</sup>O índice 100 indica que os agentes têm memória adequada à dimensão inicial do grupo

esperar. Entre estes limites que dependem da capacidade da natureza de sustentar a população, a dimensão do grupo aumenta logisticamente em função da memória e a variação é tanto mais pronunciada quanto menor a pressão ecológica.

## 4

## Discussão geral

A cooperação é a chave da organização e diversidade biológica na evolução. Como diz Nowak (2006) “*The two fundamental principles of evolution are mutation and natural selection. But evolution is constructive because of cooperation. New levels of organization evolve when the competing units on the lower level begin to cooperate. Cooperation allows specialization and thereby promotes biological diversity. Cooperation is the secret behind the open endedness of the evolutionary process. Perhaps the most remarkable aspect of evolution is its ability to generate cooperation in a competitive world. Thus, we might add ‘natural cooperation’ as a third fundamental principle of evolution beside mutation and natural selection.*”

O estudo presente explora a importância da cognição para a cooperação no tempo de vida dos agentes em circunstâncias adversas à sobrevivência. Em particular, a importância da memória e da linguagem ao serviço da reciprocidade.

Na introdução dissemos que se a cooperação (baseada na reciprocidade) resolve a TBC no tempo de vida dos agentes e a cognição é necessária à cooperação, então, condições ecológicas adversas devem pressionar selectivamente a evolução da cognição por meio da necessidade de cooperação para a sobrevivência. Aqui divido este argumento em três partes:

1. A cooperação resolve a TBC no tempo de vida dos agentes.
2. A cognição é necessária à cooperação.
3. Condições ecológicas adversas devem pressionar selectivamente a evolução da cognição por meio da necessidade de cooperação para a sobrevivência.

O modelo desenvolvido e as experiências efectuadas preocupam-se com as partes 1 e 2 deste argumento. Nesta discussão, os aspectos principais dos resultados obtidos são revistos, reinterpretados. Veremos que apoiam 1 e 2, e no final sugere-se que este tipo de modelo deve servir à investigação da parte 3 - uma perspectiva de investigação para o futuro. Mas antes, é feita uma revisão crítica do modelo desenvolvido.

## 4.1 Revisão crítica do modelo

O modelo desenvolvido baseia-se nas condições fundamentais necessárias à reciprocidade e previstas pela teoria: interacções frequentes e continuadas, alguma capacidade de reconhecer os indivíduos em interacções e o seu comportamento para agir de acordo. Sem elas não seria possível sustentar a cooperação em competição com o oportunismo. Uma vantagem do tipo de abordagem empregue é não ser necessário especificar quaisquer condições adicionais para além do *design* dos agentes e das interacções entre eles. Assim, colocando-nos num mundo virtual em que é possível manipular as circunstâncias de pressão ecológica, observa-se e descreve-se os fenómenos emergentes.

Todos os parâmetros do modelo foram definidos empiricamente de modo que as possibilidades de sobrevivência dos agentes fossem simultaneamente prejudicadas pelas circunstâncias ecológicas, e promovidas por uma frequência de interacções suficiente para permitir a eficiência da cooperação - as circunstâncias maximizam o valor de  $w$ . Com isto, é possível investigar o efeito da cooperação condicional em competição com o oportunismo para a sobrevivência.

O *design* dos agentes é explícito. A cooperação não é um fenómeno emergente. Só o seria se esse mecanismo fosse seleccionado num processo evolutivo, ou se o *design* dos agentes resultasse da sua adaptação às circunstâncias de modo que cada um no grupo aprendesse a cooperar no seu tempo de vida para os objectivos pessoais e dos outros agentes no grupo. (Doran et al., 1997). Os agentes não aprendem a cooperar. Quando muito decidem não cooperar com quem não é cooperativo. A cooperação é própria do *design* dos agentes e o fenómeno emergente é a rede de reciprocidade possibilitada pela detecção e controlo pessoal e social do oportunismo - no caso dos agentes deliberativos que têm memória de identidades e comportamentos e podem participar na difusão dessa informação, pelo que os aspectos cognitivos descritos também não são emergentes, mas próprios do *design* dos agentes.

Memória e linguagem são neste estudo uma redução operacional do que entendemos destes conceitos em linguagem comum. Estes aspectos, juntamente com a percepção dos agentes, mobilidade e considerações energéticas não pretendem reflectir directamente a realidade humana e dos primatas não humanos, mas diminuir a sua complexidade de modo a avaliar qualitativamente a possível interacção entre cognição e ecologia, e observar a sociedade emergente. Não se afirma aqui que a natureza da cognição e cooperação seja tal e qual o modelo descreve, mas que os resultados de um modelo tão simples como este, baseado na descrição do mundo e actividade dos agentes, e nas condições necessárias previstas para a estabilidade

da cooperação, apoiam as previsões teóricas e laboratoriais sobre a manutenção da cooperação.

O tempo de vida dos agentes não é limitado. Tal limitação só seria relevante se o modelo fosse adaptado para um estudo da evolução de modo que antes do final das simulações (aos dois mil *ticks* quando as populações parecem estabilizar) fosse produzida uma nova geração que substituísse a anterior.

O processo de partilha de energia descrito é imediato e ocorre sem necessidade de os agentes se aproximarem, mas desde que ambos se encontrem no campo de visão daquele que faz o pedido. O processo resulta em que ao final da partilha os dois fiquem com a mesma energia. Não houve motivos para considerar outra forma, mas seria interessar explorar a situação em que o altruísta preocupado com a sua própria sobrevivência partilha energia mas mantém alguma vantagem relativamente ao outro.

Este modelo realça a importância de, ao pensar na evolução, considerar mais atentamente aspectos ecológicos, cognitivos e interações entre eles à escala temporal do tempo de vida dos agentes.

## 4.2 Relevância dos resultados

O decrescimento inicial rápido da população total devido à escassez de recursos energéticos – observado nas experiências 2 a 5 – pode ser interpretado como consequência inevitável da sobre-população devido a qualquer evento anterior, como por exemplo a eliminação catastrófica e repentina de uma parte dos recursos existentes previamente ao início das simulações, ou a ocupação recente de um novo nicho ecológico que não sustenta nenhuma população desta dimensão. Nestas circunstâncias e em qualquer das circunstâncias de pressão ecológica estudadas, é melhor todos cooperarem do que ninguém cooperar (E1). E quanto maior a adversidade ecológica, maior a pressão para cooperar, já que, quanto maior a escassez de recursos, maiores as necessidades energéticas da população em geral e maior o número total de pedidos de partilha de energia. Pela capacidade de redistribuição continua dos recursos energéticos disponíveis no meio, a estratégia cooperativa aumenta as possibilidades de sobrevivência de todos os agentes, e portanto é uma estratégia colectiva de sobrevivência, ao contrário da não cooperação que é uma estratégia pessoal de sobrevivência. Mas se uma parte dos agentes não coopera e se aproveita da cooperação incondicional dos outros, então, a população cooperativa dispensa uma parte dos recursos adquiridos sem qualquer retorno sacrificando-se para vantagem exclu-

siva dos oportunistas que para além das árvores têm essa fonte de energia móvel alternativa (E2). A experiência 2 mostra que neste caso, cooperar diminui as possibilidades de sobrevivência relativamente a não cooperar, que nestes termos e aparte questões morais, é a melhor escolha. Ainda assim, note-se que as possibilidades de sobrevivência dos oportunistas não são superiores ao caso da experiência 1, em que ninguém na população coopera. Estes resultados são semelhantes aos de Zibetti et al. (2016) e previstos matematicamente por Enquist e Leimar (1993) como descrito na secção 1.4.

## **A cognição é necessária à cooperação**

Como sugerido por Trivers (1971) e Axelrod e Hamilton (1981), um mecanismo simples de aprendizagem social deve permitir sustentar a cooperação, nomeadamente a memória (secção 1.4) ao serviço da TFT, isto é, da reciprocidade directa (secção 1.3). Utilizando o modelo descrito na secção 1.7, Zibetti et al. (2016) investigam a importância da memória para o sucesso da cooperação num meio em que as condições para a sobrevivência são adversas. Nesse modelo, a memória é o registo das últimas três respostas a pedidos de partilha de energia, e em função de três respostas consecutivas iguais, os agentes adoptam um comportamento semelhante à estratégia TFT, passando a responder a cada pedido seguinte de modo igual à resposta obtida no último pedido efectuado, podendo ainda tornar-se cooperativos ou não cooperativos após mais três respostas consecutivas iguais, cooperativas ou não cooperativas respectivamente. Os autores concluem que se o número inicial de agentes que não cooperam for inferior a 30% o ideal é optar pela estratégia cooperativa, que nestas circunstâncias é a que garante mais possibilidades de sobrevivência. Contudo, estes autores não simulam a reciprocidade directa exactamente como definida e investigada por Trivers (1971) e Axelrod e Hamilton (1981), assumindo em vez disso que os agentes fazem uma generalização sobre o comportamento da população com base na memória das interacções mais recentes iniciadas pelo próprio.

Para o propósito de investigar o efeito de adaptações cognitivas e sociais, nas experiências 2 a 5 considerou-se a condição de pressão ecológica média. A cooperação é nestes casos condicional e os agentes são deliberativos. Na experiência 3 considerou-se uma população mista e uniforme de agentes cooperativos com memória das interacções passadas em competição com a estratégia não cooperativa. A memória é um registo das identidades e comportamentos dos outros agentes e permite assim adequar o comportamento futuro a cada agente conhecido em interacções passadas, e à maneira da estratégia TFT (que ao primeiro pedido é sempre

cooperativa). Ainda que o sucesso da população cooperativa não tenha sido superior ao sucesso da população não cooperativa, observou-se um isolamento emergente da população cooperativa e assim verificou-se o potencial da memória ao serviço da reciprocidade. O resultado foi a criação de um rede de reciprocidade permitida pela estratégia de defesa pessoal intrínseca à estratégia TFT. Desta forma é possível compensar o esforço altruísta e sustentar um pequeno grupo cooperativo resistente ao oportunismo. Resultados que apoiam 2.

Adaptações sociais como o uso da linguagem para a identificação colaborativa dos oportunistas permitem contra-atacar os efeitos da mobilidade e favorecer a cooperação (Dunbar, 2004; Enquist e Leimar, 1993). A experiência 4 é inspirada nessa possibilidade. Sempre que dois agentes partilham energia também partilham informação sobre o comportamento de outros agentes. Tal como na experiência 3, a memória está ao serviço da estratégia TFT mas grande parte do conhecimento sobre o comportamento dos outros agentes é obtido indirectamente pelo uso da linguagem como definida. Por isso, neste caso, a reciprocidade é directa e indirecta. A resistência ao oportunismo é colectiva, e pelo facto da difusão de informação na rede ser muito rápida, a promoção das possibilidades de sobrevivência dos agentes cooperativos é considerável, por oposição à diminuição radical do número de sobreviventes não cooperativos, que sendo rapidamente detectados e excluídos da rede deixam de poder servir-se do suporte social oferecido pela população cooperativa. Resultados que apoiam 2.

A experiência 5 considera a situação em que agentes cooperativos e não cooperativos têm as mesmas possibilidades cognitivas. A motivação para o fazer parte da sugestão de Enquist e Leimar (1993) de que adaptações complexas como as consideradas só podem ser seleccionadas num processo evolutivo se revelarem vantagens competitivas. O oportunismo na experiência 4 não é competição “à altura” e a sua eventual extinção num processo evolutivo tornaria supérfluas as vantagens cognitivas dos agentes cooperativos, que só podem prevalecer em meios suficientemente competitivos. Por isso, não querendo negligenciar a investigação da cognição da não cooperação, considerar a ausência de diferenças cognitivas parece um bom ponto de partida. Neste caso, os resultados mostram que a estabilização da cooperação não é tão evidente e que as populações tendem para a coexistência sob o domínio da população cooperativa. Na sequência das experiências 1 a 5, esta é provavelmente a mais interessante: o sucesso da cooperação é superior ao caso em que só os agentes cooperativos têm memória, pelo que a sociedade mesmo na ausência de diferenças cognitivas promove a cooperação. Resultados que apoiam 2.

Nas experiências 4 e 5 a reciprocidade indirecta baseia-se no conhecimento directo do comportamento dos outros agentes, por isso pode dizer-se que se baseia numa avaliação moral binária como descrito na secção 1.6. O aspecto mais interessante é que na experiência 5 os agentes não cooperativos denunciam tanto os (i) agentes cooperativos como os (ii) não cooperativos. O que no caso (i) pode ser interpretado como uma forma de vingança: o agente cooperativo sofre as consequências do que se pode chamar castigo altruísta (secção 1.6) vendo os seus pedidos rejeitados por todos aqueles que tenham conhecimento dessa atitude e não tenham experiência pessoal do seu comportamento. Ainda assim, e como previsto pela teoria (Nowak e Sigmund, 1998; Leimar e Hammerstein, 2001; Panchanathan e Boyd, 2003), o castigo altruísta promove a cooperação. Podemos por isso supor que o funcionamento da sociedade como definida maximiza o valor de  $q$ . O caso (ii) pode ser interpretado como uma forma de egoísmo de 2ª ordem: participando na exclusão social de outros oportunistas aumenta a disponibilidade de recursos para o próprio. Do ponto de vista de um agente cooperativo que recebe uma denuncia, tal até poderia ser considerado um acto altruísta merecedor de boa reputação por potencialmente proteger a rede da exploração. Ou não, por poder ser considerado um acto vingativo merecedor de um julgamento moral negativo. Mas não é do âmbito desta primeira abordagem considerar as complicações emergentes da possibilidade de comunicação e reputação consequente. O que isto sugere, é que, quanto maior a quantidade de informação a que os agentes têm acesso e capacidade de decisão em função dessa informação, maior a complexidade das interações e possibilidades interpretativas dos fenómenos emergentes – em aproximação eventual à realidade da complexidade da moral humana (um exemplo descrito na secção 1.6 previsto pela teoria e verificado em laboratório é a possibilidade dos agentes de justificarem o castigo altruísta). Tudo porque nas circunstâncias do modelo, a cooperação é exigida pela pressão ecológica para a sobrevivência, e requer adaptações cognitivas e comportamentais para garantir a sua estabilidade em competição com o oportunismo.

A experiência 6 pretendeu investigar até que ponto é que as interpretações feitas das experiências anteriores seriam válidas em condições mais adversas à sobrevivência, e considerando populações iniciais mistas mas não uniformes. Os resultados não determinam as condições para a evolução de cada tipo cooperativo-cognitivo. Os resultados determinam o sucesso de cada tipo em termos do número de sobreviventes, e sugerem que caso fosse produzida uma geração seguinte, as configurações bem sucedidas continuariam provavelmente a ser bem sucedidas. Note-se ainda que os resultados não sugerem nada sobre a origem da cooperação mas apenas as condições em que cada tipo pode prevalecer. É interessante notar que tanto na condição



de pressão ecológica média como alta, existe pelo menos uma configuração do tipo cognitivo 0 em que, pelo facto da população cooperativa ser dominante, ela não é conduzida à extinção, mas oferece suporte social suficiente para que mesmo que seja explorada consiga resistir e ser bem sucedida. Situação que não nos é estranha. Como era esperado, o número de configurações admitidas na região de sucesso aumenta com a complexidade cognitiva. Os resultados desta experiência reforçam também que a sociedade, mesmo que em parte seja prejudicial quando não há diferenças cognitivas, faz a diferença de sucesso relativamente ao caso em que apenas os agentes cooperativos memorizam interações passadas. Resultados que apoiam 2. Poderia dizer-se que pelo facto de mostrarem também que a cooperação incondicional desde que abundante permite o sucesso, a cognição não é necessária à cooperação, mas recorde-se que nos referimos à cooperação baseada na reciprocidade.

Em todas as experiências discutidas até agora, o volume de memória considerado é adequado à dimensão inicial do grupo. A experiência 7 em que se investiga a dimensão de grupo em função do volume de memória é motivada pelo trabalho de Dunbar (1992). Segundo este autor, a dimensão de alguns grupos de animais como os primatas é função do volume neocortical relativo da espécie - convencionalmente associado às capacidades de processar e armazenar informação, nomeadamente social. Como descrito na secção 1.5, essas capacidades terão evoluído para responder à complexidade da vida social permitindo monitorizar várias relações em simultâneo através do registo de identidades e padrões de comportamento. A experiência 7 pretendeu testar esta ideia considerando que à partida todos os agentes têm predisposição cooperativa mas limitada pela quantidade de relações pessoais que podem manter com base no volume de memória que possuem, ignorando eventuais interações futuras com desconhecidos. Os resultados mostram que em todas as condições de pressão ecológica e entre os limites que dependem da capacidade da natureza de sustentar a população, a dimensão do grupo aumenta logisticamente em função da memória. Esse crescimento é tanto mais pronunciado quanto menor a pressão ecológica. O pressuposto desta experiência de que só é possível cooperar com conhecidos, implica que na ausência de memória não é possível conhecer nem reconhecer ninguém, a cooperação é impossível e os resultados são idênticos aos da população não cooperativa na experiência 1. Por outro lado, e seguindo a mesma lógica, quando a memória se adequa à dimensão de grupo os resultados são idênticos aos da população cooperativa na experiência 1. Os resultados apoiam 2 e apoiam a hipótese do cérebro social (Dunbar, 1998).

## A cooperação resolve a TBC no tempo de vida dos agentes

O equilíbrio regeneração-consumo descrito na experiência 2 previne sempre a TBC como definida na introdução. Num artigo de revisão recente sobre a TBC em biologia da evolução, Rankin et al. (2007) identificam vários exemplos desse fenómeno: no genoma, em parasitas, bactérias, vírus, micróbios, plantas e entre plantas e microrganismos, insectos sociais, lesmas do mar, peixes, formigas, lagartos e humanos. Em humanos, nomeadamente, tem-se o exemplo do JBC como descrito na secção 1.6. Os autores desta revisão distinguem em cada caso o tipo de TBC. Em geral a tragédia refere-se à exploração abusiva de um recurso externo, mas maioritariamente esse termo foi aplicado a dilemas sociais de produção cooperativa de um bem comum, como no JBC, e neste caso, refere-se não só a recursos externos mas também aqueles que emergem em contextos sociais, como é o investimento na cooperação em si. A tragédia ocorre se indivíduos oportunistas exploram o bem comum sem contribuir para ele. Quando isto acontece a tragédia é de colapso, no sentido expresso por Hardin (1968), segundo o qual, se o bem se esgota a população extingue-se, ou a tragédia é de componente, no sentido em que a população é afectada ou gravemente afectada pelo oportunismo mas não se extingue, continuando a beneficiar do recurso que a sustenta. Segundo Rankin et al. (2007), a tragédia de componente é uma versão fraca da TBC, mas cuja definição é de maior importância para a categorização dos fenómenos, já que a versão de colapso ainda que intuitiva é difícil de observar empiricamente. A tragédia de componente é um conceito relativo porque depende do que se considera oportunismo, e a medida da tragédia pode depender do desvio do sucesso de um grupo em que o oportunismo é nulo relativamente aquele em que parte da população é oportunista.

No estudo presente, o bem comum é a natureza e a cooperação em si, e devido ao equilíbrio regeneração-consumo nunca ocorre a tragédia de colapso (nem da natureza nem da cooperação em si) mas em todas as configurações observa-se a tragédia de componente, que quantitativamente e independentemente do tipo cognitivo é diminuída pelo quantidade inicial de agentes cooperativos no sistema. Uma experiência mental simples que o demonstra é: considerando uma população total cooperativa, substituir à vez cada agente cooperativo por um agente não cooperativo e executar de cada vez uma simulação do tipo das experiências 2 a 5. Em função de tudo o que vimos até agora, é fácil imaginar que o aumento do número de agentes não cooperativos no sistema afecta negativamente o sucesso global.

Como vimos na secção 1.6, a possibilidade de julgamento moral motiva a alteração de comportamento e resolve a TBC porque ninguém quer perder os benefícios

de uma boa reputação. Neste modelo contudo, os agentes nunca alteraram a sua estratégia, pelo que o julgamento moral não tende a aumentar o sucesso global, mas somente o sucesso da população cooperativa que ao proteger-se do oportunismo assegura a viabilidade do bem comum (a cooperação em si), enquanto a outra, isolada do suporte social, passa a depender exclusivamente da natureza. Por isso, o julgamento moral tende a diminuir a tragédia de componente da população cooperativa e a aumentar a tragédia de componente da população não cooperativa.

Tomando a definição fraca da TBC, os resultados apoiam 1.

### 4.3 Investigação futura

Neste estudo os agentes nunca alteram a sua estratégia. Ela é cooperativa incondicional, condicional ou não cooperativa. Nem procuram maximizar a sua reputação. Agem exclusivamente de acordo com o seu *design* como descrito. Para além do que já foi dito sobre possibilidades de investigação futura, seria interessante explorar também a alteração de estratégia em função da reputação (Um egoísta esperto poderia por exemplo encontrar oportunidades de exploração dos altruístas sem que isso afectasse a sua reputação, mas se a reputação fosse negativa procuraria melhorá-la) e introduzir também erros na comunicação de informação social e a possibilidade de os corrigir, à maneira da TFTg. Estratégias tipo Pavlov também poderiam ser investigadas neste contexto.

O mais interessante será adaptar o modelo desenvolvido para um estudo da cognição para a cooperação num processo evolutivo, associando por exemplo um gene à cooperação, um à memória e outro à linguagem. Estes estariam uniformemente ligados ou desligados numa configuração inicial, e a cada geração os agentes seriam replicados, eventualmente considerando também os seus níveis de energia, de modo que, “naturalmente” os mais bem sucedidos produziram maior descendência. Como a cooperação do tipo cognitivo “mais avançado” é a estratégia que como vimos oferece mais possibilidades de sobrevivência, esperaríamos que fosse a estratégia seleccionada. Não esperaríamos contudo que o oportunismo fosse eliminado, já que várias das configurações estudadas demonstram a possibilidade de coexistência das duas estratégias. A cada nova geração haveria sempre novos indivíduos por conhecer, e como vimos pode acontecer que vários deles passem despercebidos até à hora de produzir uma nova geração. Com esta adaptação ao modelo desenvolvido será possível investigar a parte 3 do argumento.

## 5

## Conclusão

O principal contributo científico da teoria da reciprocidade é talvez a sugestão de que se este é pelo menos um dos mecanismos que sustenta a cooperação ao nível das sociedades humanas, como é aliás verificável, então, requer cognição ao nível de parcerias úteis, qualquer que seja a ordem evolutiva. Este trabalho não investiga essa ordem. O modelo apresentado serve à investigação da importância da memória e da linguagem para sustentar a cooperação em várias circunstâncias de pressão ecológica no tempo de vida dos agentes, e os resultados apoiam a ideia de que estes aspectos cognitivos maximizam o sucesso da cooperação baseada na reciprocidade em condições adversas à sobrevivência. As interpretações, estão de acordo com a investigação teórica e experimental da reputação e do comportamento e julgamento moral em dilemas de cooperação. Indirectamente os resultados apoiam também a hipótese do cérebro social, de que a cognição dos primatas terá evoluído como resposta adaptativa a uma vida social complexa.

A questão principal que motiva este estudo permanece em aberto: Será que condições ecológicas adversas pressionam selectivamente a evolução da cognição por meio da necessidade de cooperação para a sobrevivência? O modelo apresentado oferece uma base possível para explorar mais profundamente esta questão. Se a resposta é sim, então, podemos supor que toda a complexidade e variabilidade da vida social humana moderna é em parte um sub-produto indirecto da necessidade primária e ancestral de reciprocidade para promover as possibilidades de sobrevivência em condições adversas - uma perspectiva de investigação futura.

## Referências

- Alexander, R. D. (1987). *The biology of moral systems*. Transaction Publishers.
- Anh, H. T., Moniz Pereira, L., e Santos, F. C. (2011). Intention recognition promotes the emergence of cooperation. *Adaptive Behavior*, 19(4), 264–279.
- Axelrod, R., e Hamilton, W. (1981). The evolution of cooperation. *Science*, 211(4489), 1390–1396.
- Barton, R. A., e Dunbar, R. (1997). Evolution of the social brain. *Machiavellian intelligence II: Extensions and evaluations*, 2, 240.
- Bolton, G. E., Katok, E., e Ockenfels, A. (2005). Cooperation among strangers with limited information about reputation. *Journal of Public Economics*, 89(8), 1457–1468.
- Bourke. (1997). Sociality and kin selection in insects. *Behavioural ecology: an evolutionary approach*, 4, 203–227.
- Bousquet, F., e Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological modelling*, 176(3), 313–332.
- Byrne, R. W. (1996). Machiavellian intelligence. *Evol. Anthropol*, 5, 171–180.
- Byrne, R. W., e Bates, L. A. (2010). Primate social cognition: uniquely primate, uniquely social, or just unique? *Neuron*, 65(6), 815–830.
- Chapais, B., e Berman, C. M. (2004). *Kinship and behavior in primates*. Oxford University Press on Demand.
- Connor, R. C., e Norris, K. S. (1982). Are dolphins reciprocal altruists? *The American Naturalist*, 119(3), 358–374.
- De Waal, F. B., e Brosnan, S. F. (2006). Simple and complex reciprocity in primates. In *Cooperation in primates and humans* (pp. 85–105). Springer.
- De Waal, F. B., e Luttrell, L. M. (1988). Mechanisms of social reciprocity in three primate species: symmetrical relationship characteristics or cognition? *Ethology and Sociobiology*, 9(2-4), 101–118.
- Doran, J. E., Franklin, S., Jennings, N. R., e Norman, T. J. (1997). On cooperation in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 12(3), 309–314.
- Dugatkin, L. A. (1988). Do guppies play tit for tat during predator inspection visits? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 23(6), 395–399.
- Dugatkin, L. A. (1997). *Cooperation among animals: an evolutionary perspective*. Oxford University Press.
- Dunbar, R. (1988a). Evolution of grouping patterns. In *Primate social systems* (pp. 106–150). Springer.
- Dunbar, R. (1988b). Survival strategies. In *Primate social systems* (pp. 33–54).

Springer.

- Dunbar, R. (1991). Functional significance of social grooming in primates. *Folia primatologica*, 57(3), 121–131.
- Dunbar, R. (1992). Neocortex size as a constraint on group size in primates. *Journal of human evolution*, 22(6), 469–493.
- Dunbar, R. (1993). Coevolution of neocortical size, group size and language in humans. *Behavioral and brain sciences*, 16(4), 681–694.
- Dunbar, R. (1998). The social brain hypothesis. *brain*, 9(10), 178–190.
- Dunbar, R. (2004). Gossip in evolutionary perspective. *Review of general psychology*, 8(2), 100.
- Dunbar, R., Marriott, A., e Duncan, N. D. (1997). Human conversational behavior. *Human nature*, 8(3), 231–246.
- Enquist, M., e Leimar, O. (1993). The evolution of cooperation in mobile organisms. *Animal Behaviour*, 45(4), 747–757.
- Fehr, E., e Fischbacher, U. (2003). The nature of human altruism. *Nature*, 425(6960), 785.
- Fehr, E., e Gächter, S. (2002). Altruistic punishment in humans. *Nature*, 415(6868), 137–140.
- Fiske, S. T. (1992). Thinking is for doing: portraits of social cognition from daguerreotype to laserphoto. *Journal of personality and social psychology*, 63(6), 877.
- Gurven, M. (2004). Reciprocal altruism and food sharing decisions among hiwi and ache hunter-gatherers. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 56(4), 366–380.
- Gurven, M., Allen-Arave, W., Hill, K., e Hurtado, M. (2000). “it’s a wonderful life”: signaling generosity among the ache of paraguay. *Evolution and Human Behavior*, 21(4), 263–282.
- Hamilton, W. D. (1964). The genetical evolution of social behaviour. ii. *Journal of theoretical biology*, 7(1), 17–52.
- Hammerstein, P. (2003). *Genetic and cultural evolution of cooperation*. MIT press.
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons’(1968) 162. *Science*, 1243.
- Hart, B. L., e Hart, L. A. (1992). Reciprocal allogrooming in impala, aepyceros melampus. *Animal Behaviour*, 44(6), 1073–1083.
- Hauser, M. D., Chen, M. K., Chen, F., e Chuang, E. (2003). Give unto others: genetically unrelated cotton-top tamarin monkeys preferentially give food to those who altruistically give food back. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270(1531), 2363–2370.
- Hill, K. (2002). Altruistic cooperation during foraging by the ache and the evolved

- human predisposition to cooperate. *Human Nature*, 13(1), 105–128.
- Humphrey, N. K. (1976). The social function of intellect. In *Growing points in ethology* (pp. 303–317). Cambridge University Press.
- Jaeggi, A. V., e Gurven, M. (2013a). Natural cooperators: food sharing in humans and other primates. *Evolutionary Anthropology: Issues, News and Reviews*, 22(4), 186–195.
- Jaeggi, A. V., e Gurven, M. (2013b). Reciprocity explains food sharing in humans and other primates independent of kin selection and tolerated scrounging: a phylogenetic meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 280(1768), 20131615.
- James, W. (1890). *1950. the principles of psychology, vol. 1*. Dover: New York.
- Jolly, A. (1966). Lemur social behavior and primate intelligence. *Science*, 153(3735), 501–506.
- Kappeler, P. M., e Van Schaik, C. P. (2006). *Cooperation in primates and humans*. Springer.
- Knudsen, T. (2003). Simon’s selection theory: Why docility evolves to breed successful altruism. *Journal of Economic Psychology*, 24(2), 229–244.
- Leimar, O., e Hammerstein, P. (2001). Evolution of cooperation through indirect reciprocity. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 268(1468), 745–753.
- Lyle, H. F., e Smith, E. A. (2014). The reputational and social network benefits of prosociality in an andean community. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13), 4820–4825.
- Mariano, P., e Correia, L. (2014). Partner selection delays extinction in cooperative and coordination dilemmas. In *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation* (pp. 88–103).
- Milinski, M. (1987). Tit for tat in sticklebacks and the evolution of cooperation. *nature*, 325(6103), 433–435.
- Milinski, M. (1993). Evolutionary biology: cooperation wins and stays. *Nature*, 364(6432), 12–13.
- Milinski, M., Semmann, D., e Krambeck, H.-J. (2002). Reputation helps solve the ‘tragedy of the commons’. *Nature*, 415(6870), 424.
- Milinski, M., e Wedekind, C. (1998). Working memory constrains human cooperation in the prisoner’s dilemma. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(23), 13755–13758.
- Nowak, M. A. (1990). Stochastic strategies in the prisoner’s dilemma. *Theoretical population biology*, 38(1), 93–112.

- Nowak, M. A. (2006). Five rules for the evolution of cooperation. *science*, 314(5805), 1560–1563.
- Nowak, M. A., e Sigmund, K. (1992). Tit for tat in heterogenous populations. *Nature*, 355(6357), 250.
- Nowak, M. A., e Sigmund, K. (1993). A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the prisoner’s dilemma game. *Nature*, 364(6432), 56–58.
- Nowak, M. A., e Sigmund, K. (1994). The alternating prisoner’s dilemma. *Journal of theoretical Biology*, 168(2), 219–226.
- Nowak, M. A., e Sigmund, K. (1998). The dynamics of indirect reciprocity. *Journal of theoretical Biology*, 194(4), 561–574.
- Nowak, M. A., e Sigmund, K. (2005). Evolution of indirect reciprocity. *Nature*, 437(7063), 1291–1298.
- Packer, C. (1977). Reciprocal altruism in papio anubis. *Nature*, 265(5593), 441–443.
- Panchanathan, K., e Boyd, R. (2003). A tale of two defectors: the importance of standing for evolution of indirect reciprocity. *Journal of theoretical biology*, 224(1), 115–126.
- Rand, D. G., e Nowak, M. A. (2013). Human cooperation. *Trends in cognitive sciences*, 17(8), 413–425.
- Rankin, D. J., Bargum, K., e Kokko, H. (2007). The tragedy of the commons in evolutionary biology. *Trends in ecology & evolution*, 22(12), 643–651.
- Santos, F. C., Pacheco, J. M., e Lenaerts, T. (2006). Cooperation prevails when individuals adjust their social ties. *PLoS computational biology*, 2(10), e140.
- Santos, F. C., Pacheco, J. M., e Skyrms, B. (2011). Co-evolution of pre-play signaling and cooperation. *Journal of Theoretical Biology*, 274(1), 30–35.
- Seinen, I., e Schram, A. (2006). Social status and group norms: Indirect reciprocity in a repeated helping experiment. *European Economic Review*, 50(3), 581–602.
- Simon, H. A. (1990). A mechanism for social selection and successful altruism. *Science(Washington)*, 250(4988), 1665–1668.
- Simon, H. A. (1992). Altruism and economics. *Eastern Economic Journal*, 18(1), 73–83.
- Simon, H. A. (1993). Altruism and economics. *The American Economic Review*, 83(2), 156–161.
- Smith, E. A. (2010). Communication and collective action: language and the evolution of human cooperation. *Evolution and Human Behavior*, 31(4), 231–245.
- Sperber, D., e Baumard, N. (2012). Moral reputation: An evolutionary and cognitive



- perspective. *Mind & Language*, 27(5), 495–518.
- Stevens, J. R., Cushman, F. A., e Hauser, M. D. (2005). Evolving the psychological mechanisms for cooperation. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 36, 499–518.
- Stevens, J. R., e Gilby, I. C. (2004). A conceptual framework for nonkin food sharing: timing and currency of benefits. *Animal Behaviour*, 67(4), 603–614.
- Stevens, J. R., e Hauser, M. D. (2004). Why be nice? psychological constraints on the evolution of cooperation. *Trends in cognitive sciences*, 8(2), 60–65.
- Sugden, R. (1986). The economics of cooperation, rights and welfare. *New York: Blakwell*.
- Taylor, C. E., e McGuire, M. T. (1988). Reciprocal altruism: 15 years later. *Ethology and Sociobiology*, 9(2-4), 67–72.
- Tomasello, M. (2009). *Why we cooperate*. MIT press.
- Trivers, R. L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *The Quarterly review of biology*, 46(1), 35–57.
- Trivers, R. L. (2006). Reciprocal altruism: 30 years later. *Cooperation in primates and humans: Mechanisms and evolution*, 67–83.
- Wedekind, C., e Milinski, M. (1996). Human cooperation in the simultaneous and the alternating prisoner's dilemma: Pavlov versus generous tit-for-tat. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(7), 2686–2689.
- Wedekind, C., e Milinski, M. (2000). Cooperation through image scoring in humans. *Science*, 288(5467), 850–852.
- Whiten, A., e Byrne, R. W. (1997). *Machiavellian intelligence ii: Extensions and evaluations* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Wilensky, U. (1999). *Netlogo* (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>). Northwestern University, Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Retrieved from <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- Wilkinson, G. S. (1984). Reciprocal food sharing in the vampire bat. *Nature*, 308(5955), 181–184.
- Wilkinson, G. S. (1988). Reciprocal altruism in bats and other mammals. *Ethology and Sociobiology*, 9(2-4), 85–100.
- Williams, G. C. (1966). *Adaptation and natrual selection: a critique of some current evolutionary thought* (Tech. Rep.).
- Wu, J., Balliet, D., e Van Lange, P. A. (2016). Reputation, gossip and human cooperation. *Social and Personality Psychology Compass*, 10(6), 350–364.
- Zibetti, E., Carrignon, S., e Bredeche, N. (2016). Acacia-es: an agent-based modeling and simulation tool for investigating social behaviors in resource-limited two-dimensional environments. *Mind & Society*, 15(1), 83–104.